

Schlussbericht zum Vorhaben:

Biowaste to Products (BW2Pro)

Konsortialkoordination:
ISWA Universität Stuttgart
LAB Universität Hohenheim

L-Bank-ID:
2076000

Förderung: VwV EFRE Förderung von Bioraffinerien zur Gewinnung von Rohstoffen aus Abfall und Abwasser – Bio-Ab-Cycling (VwV EFRE Bioökonomie 2021-2027)



Baden-Württemberg



**Kofinanziert von der
Europäischen Union**

Förderzeitraum des Vorhabens:
28.10.2021 – 31.10.2024

Berichtszeitraum:
28.10.2021 - 31.10.2024

Konsortium: Universität Stuttgart (ISWA, IGVP, IKT, IER), Universität Hohenheim (LAB), Novis GmbH (Novis), Hochschule Offenburg (HSO), Fraunhofer IGB (IGB), ifeu Heidelberg (ifeu)

Autoren: Dr. Oechsner, Hans (LAB); Steffens, Axel (ISWA)

unter Mitarbeit von: Dr. Hülsemann, Benedikt; Baumgart, Marian; Dr. Sailer, Gregor; Dr. Dinkler, Konstantin (LAB); Dr. Maurer, Claudia; Dr. Huang, Jingjing; Preyl, Volker; Voßschmidt, David; Lara, Cinthya; Ak, Mustafa (ISWA).

Ferner sind Beiträge enthalten von:

Dr. Helle, Thomas (Novis)

Dr. Wilke, Andreas; Zielińska, Olga (HSO)

Chaumette, Christiane; Bohn, Michael (IGB)

Achenbach, Birk (IGVP)

Dr. Weinmann, Sandra (IKT)

Reinhardt, Joachim; Veith, Corvin (ifeu)

Dr. Eltrop, Ludger (IER)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	- 4 -
Tabellenverzeichnis.....	- 5 -
Abkürzungsverzeichnis.....	- 6 -
Einheitenverzeichnis.....	- 7 -
Kurzzusammenfassung des Gesamtvorhabens.....	- 8 -
1 Einleitung.....	- 9 -
1.1 Hintergrund und Ziel	- 9 -
1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens	- 10 -
1.3 Stand von Wissenschaft und Technik	- 10 -
2 Durchführung des Vorhabens	- 11 -
2.1 Aufgabenstellung, Zielsetzung und Arbeitspakete (AP).....	- 11 -
2.2 Planung und Ablauf des Vorhabens	- 13 -
2.3 Raffination auf der Pilotanlage (AP 1 – 4).....	- 13 -
2.3.1 Aufbereitung von Bioabfall und Störstoffabscheidung (AP 1).....	- 13 -
2.3.2 Thermodruckhydrolyse: Aufschluss und Separierung (AP 2).....	- 16 -
2.3.3 Hochleistungsfermentation (AP 3)	- 17 -
2.3.4 Faseraufbereitung und -nutzung (AP 4).....	- 18 -
2.4 Sekundärraffination im Labor (AP 5 - 7)	- 19 -
2.4.1 Cellulaseproduktion (AP 5)	- 19 -
2.4.2 Nährstoffrückgewinnung (AP 6).....	- 20 -
2.4.3 Biokunststoffproduktion (AP 7)	- 20 -
2.5 Bewertung und Öffentlichkeitsarbeit (AP 8 - 10)	- 23 -
2.5.1 Ökologische Bewertung (AP 8).....	- 23 -
2.5.2 Ökonomische Bewertung (AP 9).....	- 24 -
2.5.3 Öffentlichkeitsarbeit und Transfer (AP 10).....	- 26 -
2.6 Zeitlicher Ablauf.....	- 26 -
3 Ergebnisse und Bewertung des Vorhabens.....	- 27 -
3.1 Aufbereitung von Bioabfall und Störstoffabscheidung (AP 1)	- 27 -
3.2 Thermodruckhydrolyse: Aufschluss und Separierung (AP 2).....	- 29 -
3.3 Hochleistungsfermentation (AP 3).....	- 37 -
3.4 Faseraufbereitung und -nutzung (AP 4)	- 39 -
3.5 Cellulaseproduktion (AP 5).....	- 40 -
3.6 Nährstoffrückgewinnung (AP 6).....	- 43 -
3.7 Biokunststoffproduktion (AP 7)	- 47 -
3.7.1 Biologische PHA-Produktion (AP 7.1).....	- 47 -
3.7.2 Aufbereitung von PHA (AP 7.2)	- 51 -
3.8 Ökologische Bewertung (AP 8)	- 53 -
3.9 Ökonomische Bewertung (AP 9)	- 57 -
3.10 Öffentlichkeitsarbeit und Transfer (AP 10)	- 59 -
4 Praktische Anwendbarkeit und Roll-out des Vorhabens	- 60 -
5 Fazit und Ausblick/Entwicklungsperspektive.....	- 62 -
6 Literaturverzeichnis	- 64 -

Anhang 1	Abbildungen.....	- 66 -
Anhang 2	Öffentlichkeitsarbeit	- 73 -
Anhang 3	Meilensteine der APs.....	- 76 -
Anhang 4	Quellennachweis Piktogramme.....	- 78 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kreislaufschema des BW2Pro-Projekts (Quelle: siehe Anhang 4)	12 -
Abbildung 2: Funktionsweise eines Hydrozyklonabscheiders (Quelle: Yi et al. 2021).....	14 -
Abbildung 3: Versuchsaufbau an der Thermodruckhydrolyse in Backnang (2024)	16 -
Abbildung 4: Schema der installierten Thermodruckhydrolyse in Backnang (2024).....	17 -
Abbildung 5: Übersicht der Hauptleitungen der Pilotanlage und wichtige Prozessparameter	17 -
Abbildung 6: Messtechnik und Pumpen im Filtrattank, der Hydrolyse, der Filtration und im Zwischentank.....	18 -
Abbildung 7: Messtechnik und Pumpen im Zwischentank, Festbettfermenter und Gärresttank, sowie die Gasmessstrecken der Hydrolyse und des Festbettfermenters	18 -
Abbildung 8: Pressformen für Mustertöpfe	19 -
Abbildung 9: Rohmaterial (links), Rohstoff (rechts).....	19 -
Abbildung 10: Darstellung der Prozesskette vom monomeren Rohstoff bis zum fertigen Bauteil und darin beinhaltet das Teilprojekt des IKT: Modul 8/AP 7.2 „Polymerkonditionierung“	22 -
Abbildung 11: Investitionskosten für SteamFiber05-Standardmodul (Quelle: H. Dauser, Fa. Fibres ³⁶⁵ GmbH)	25 -
Abbildung 12: Störstoffgehalt des Bioabfalls innerhalb eines Jahres, zugeordnet zu den jeweiligen Jahreszeiten.	27 -
Abbildung 13: TR-Gehalt (links) und oTR-Gehalt (rechts) des Bioabfalls.....	28 -
Abbildung 14: Glührückstand der abgeschiedenen Störstoffe aus den Störstoffbehältern	28 -
Abbildung 15: Abscheidegrad des Hydrozyklons bei einer Fördergeschwindigkeit von 20 m³/h (links) und 30 m³/h (rechts)	29 -
Abbildung 16: Milchsäure in der Trockenmasse über die untersuchten Temperatur- und Haltezeiteinstellungen (angegeben in Minuten) an der TDH. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für p < 0,05 TUKEY HSD/KRAMER	31 -
Abbildung 17: Essigsäuregehalt in der Trockenmasse über die untersuchten Temperatur- und Haltezeiteinstellungen (angegeben in Minuten) an der TDH. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für p < 0,05 TUKEY HSD/KRAMER	32 -
Abbildung 18: Buttersäuregehalt in der Trockenmasse über die untersuchten Temperatur- und Haltezeiteinstellungen (angegeben in Minuten) an der TDH. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für p < 0,05 TUKEY HSD/KRAMER	33 -
Abbildung 19: Spez. Methanertrag in der org. Trockenmasse über die untersuchten Temperatur- und Haltezeiteinstellungen (angegeben in Minuten) an der TDH. Unter-schiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für p < 0,05 TUKEY HSD/KRAMER	33 -
Abbildung 20: Untersuchung von toxischen Stoffen in mg/kg Trockenmasse in der abgetrennten Pülpe: Zink und Nickel.....	34 -
Abbildung 21: Untersuchung von toxischen Stoffen in mg/kg Trockenmasse in der abgetrennten Pülpe: Kupfer und Chrom	34 -
Abbildung 22: Untersuchung von toxischen Stoffen in mg/kg Trockenmasse in der abgetrennten Pülpe: Blei und Cadmium	34 -
Abbildung 23: Frischmassebilanzierung der Pilotanlage Thermodruckhydrolyse bezogen auf Inputmasse	35 -
Abbildung 24: Bilanz der organischen Trockenmasse bezogen auf Inputmasse	36 -
Abbildung 25: Energiebilanzierung der Thermodruckhydrolyse bezogen auf den Energiegehalt des Inputmaterials (Bioabfall).....	36 -
Abbildung 26: Spezifischer Methanertrag über die organische Raumbelastung aufgetragen; Rote Linie: durchschnittliches Methanpotential Pülpe laut HBT nach VDI-Richtlinie 4630; jeder Punkt entspricht Mittelwert eines Messtages	38 -
Abbildung 27: Spezifischer Methanertrag über die Verweilzeit aufgetragen; Rote Linie: durchschnittliches Methanpotential Pülpe laut HBT nach VDI-Richtlinie 4630; jeder Punkt entspricht Mittelwert eines Messtages	38 -
Abbildung 28: Faserpflanztopfmuster.....	39 -
Abbildung 29: Musterstück (links), Musterübergabe bei der Abschlussveranstaltung in Hohenheim (rechts).....	39 -
Abbildung 30: Lehmdämmstein (links), Faserbrikett (Mitte), Vließmatte (rechts)	40 -
Abbildung 31: Analyse wichtiger Inhaltsstoffe des synthetischen Labormediums und der Pülpe aus Bioabfall	41 -
Abbildung 32: Produktivitätsentwicklung bei der Kultivierung von Trichoderma reesei: Prozessoptimierung und Auswirkungen des Bioabfallmediums mit den Stämmen T.reesei PC-3-7 (blauer Hintergrund) und T.reesei RL-P37 (gelber Hintergrund). Die ersten 8 dargestellten Raum-Zeit- Ausbeuten basieren auf reinem Labormedium.	41 -

Abbildung 33: Enzymatische Hydrolyse von Weizenstroh (thermodruckhydrolysiert) als Positivkontrolle und vorbehandelte Fasern des Bioabfalls (ebenfalls nach Thermodruckhydrolyse).	42 -
Abbildung 34: Spezifische kumulative Biogasproduktion von künstlichem Bioabfall mit und ohne Vorbehandlung durch Cellulasen im Biogasbatchversuch nach VDI 4630.	43 -
Abbildung 35: Elemente im Flüssiggärrest der laufenden Biovergärungsanlage (vom 2. Juli 2024, Bestimmung von Elementen mit induktiv gekoppeltem Plasma mittels Atomemissionsspektrometrie ICP-OES nach DIN EN ISO 11885)	44 -
Abbildung 36: Elemente im Flüssiggärrest der Demonstrationsanlage (vom 2. Juli 2024, Bestimmung von Elementen mit in-duktiv gekoppeltem Plasma mittels Atomemissionsspektrometrie ICP-OES nach DIN EN ISO 11885)	44 -
Abbildung 37: Phosphat und Ammonium im Flüssiggärrest. Messung mittels Hach-Lange Küvettschnelltests Orthophosphat (LCK350), Ammonium-Stickstoff (LCK303), n=3	45 -
Abbildung 38: gelöstes Calcium und Magnesium im Flüssiggärrest. Messung mittels Hach-Lange Küvettschnelltest Magnesium und Calcium (LCK327), n=3	45 -
Abbildung 39: Wachstumsraten von C. necator (□) und B. glumae (Δ) in Abhängigkeit von der Substratkonzentration. Kohlenstoffvariationen aufgenommen mit 1,2 g L-1 Ammonium als Stickstoffquelle, Stickstoffvariationen mit 10 g L-1 Glucose als Stickstoffquelle.....	48 -
Abbildung 40: Prozessdifferenzierte Ergebnisse im Treibhauseffekt für die Fasernutzung ohne vorausgehende Faser- und Pülpetrennung.....	54 -
Abbildung 41: Ergebnisse im Treibhauseffekt für verschiedene Szenarien der Pülpenutzung bei Nutzung der verbleibenden Fasern als Mulch: Nettoergebnisse Pilot- und Großmaßstab.....	54 -
Abbildung 42: Ergebnisse im Treibhauseffekt für verschiedene Szenarien der Pülpenutzung bei Nutzung der verbleibenden Fasern als Mulch: Ergebnisse nach Prozessen.....	55 -
Abbildung 43: Ergebnisse im Treibhauseffekt für verschiedene Szenarien der Pülpenutzung bei Nutzung der verbleibenden Fasern als Mulch: Hauptbeiträge zum Lebenszyklus PHA- und Cellulaseproduktion in den Szenarien PHA bzw. Cellulasemarkt CM	55 -
Abbildung 44: Ergebnisse im Treibhauseffekt für verschiedene Szenarien der Pülpenutzung bei Nutzung der verbleibenden Fasern in der Topfproduktion.....	56 -
Abbildung 45: Normierte Ergebnisse für das abgeleitete Mischszenario in allen Indikatoren (rote Säule) im Vergleich zur Kompostierung und Vergärung (blaue bzw. grüne Säulen).....	57 -
Abbildung 46: Materialflussdiagramm und Massenbilanz des Gesamtprozesses – Beispiel eines Sankey-Diagramms zur Veranschaulichung der Systemkomponenten und ihrer mengenmäßigen Verknüpfung.	58 -
Abbildung 47: Zerkleinerungseinheit außerhalb der Halle	66 -
Abbildung 48: Aufbereitungsaggregate innerhalb der Halle.....	66 -
Abbildung 49: Verfahrensschema der Aufbereitung von Bioabfall (Quelle: siehe Anhang 4).....	67 -
Abbildung 50: Schaltschrank der TDH (links), Hydrolysereaktor 400 l (mitte), Expansionstank 200 l und Pulper, sowie Entstipper (rechts).....	67 -
Abbildung 51: Linkes Bild: Biogasanlage mit Hydrolysereaktor (links), Festbetteaktor (Mitte) und zwei Vorlagetanks (rechts); Mitte: Füllkörper und Feststofflaborfermenter; Rechts: Filtrationseinheit und Pumpen	67 -
Abbildung 52: täglicher Störstoffgehalt.....	68 -
Abbildung 53: organische Säuren im Bioabfall.....	68 -
Abbildung 54: Massenbilanz der Aufbereitung von 700 kg Bioabfall (Quelle: siehe Anhang 4).....	69 -
Abbildung 55: Von oben links im Uhrzeigersinn: Rohstoff, feucht; Siebüberlauf, feingesiebt, Rohstoff trocken, Rohstoff gebleicht, Rohstoff gebleicht, gemahlen.....	69 -
Abbildung 56: Siebüberlauf mit Grobfraction aus der Faser	70 -
Abbildung 57: Thermogramme der PHB/PHBV-Blends sowie der Ausgangswerkstoffe PHB und PHBV	71 -
Abbildung 58: Meilensteine der APs 0-3	76 -
Abbildung 59: Meilensteine der APs 4-7	77 -
Abbildung 60: Meilensteine der APs 8-10	77 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Liste der Projektpartner und zugehörigen Arbeitspakete	12 -
Tabelle 2: Vergleich der Abscheidegrade des Hydrozyklons in Abhängigkeit des Förderstroms.....	29 -
Tabelle 3: Ergebnisse aus der Analyse des Trockenmassegehaltes über die untersuchten Schweregradfaktoren (SF-Faktor) und damit Behandlungen an der TDH. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für $p < 0,05$ TUKEY HSD/KRAMER -	30 -

Tabelle 4: Ergebnisse aus der Analyse des Rohfasergehaltes in der Trockenmasse über die untersuchten Behandlungen an der TDH. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für $p < 0,05$ TUKEY HSD/KRAMER	30 -
Tabelle 5: Fermentationsparameter und Ergebnisse in verschiedenen Maßstäben, Ungenauigkeit angegeben als Standardfehler, produzierte Polymermenge als Masse bei Fermentationsernte, Aufreinigungsausbeute nicht einberechnet	48 -
Tabelle 6: Charakterisierung der erhaltenen Prozesswässer der Thermodruckhydrolyse und Zusammensetzung des synthetischen Mischsubstrates	49 -
Tabelle 7: PHA-Proben, die am IGVP im Rahmen des BW2Pro-Projekts hergestellt wurden, und die an die IKT gesendete Mustermenge	50 -
Tabelle 8: Thermische Kennwerte der mit verschiedenen Weichmachern modifizierten PHB	51 -
Tabelle 9: Mechanische Kennwerte der PHB/PHBV-Blends	53 -
Tabelle 10: Struktur und Gebühr für Bioabfallentsorgung in den Kreisen Rems-Murr und Ludwigsburg	58 -
Tabelle 11: Preise für Komposterde (Stand: Januar 2023)	58 -
Tabelle 12: Investitionskosten für die Biovergärungsanlage	59 -
Tabelle 13: Gesamtinvestitionskosten	59 -
Tabelle 14: Korrelationsanalyse diverser Fermentationsparameter zu Identifizierung der Haupteinflussgrößen aus den Copolymeranteil (3-Hydroxyvalerat). Angegeben sind der Pearson Koeffizient r und der Signifikanztest für lineare Abhängigkeit durchgeführt auf dem angegebenden Signifikanzniveau α („Wahr“ entspricht dem Ablehnen der Nullhypothese) (Obilor und AMADI 2018). CO_2 Löslichkeit berechnet nach Carroll et al. (1991), O_2 Konzentration berechnet über die durchschnittliche Sättigung und der Löslichkeit nach The engineering ToolBox (2005)	72 -

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	BESCHREIBUNG
ADF	Säure-Detergenzien-Faser
Aq	Aqua
BA	Bioabfall
Cd	Cadmium
CM	Cellulasemarkt
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie
GS	Gutschriften
GBT	Hohenheim Biogasertragstest
HMT	Hydroxymethylfurfural
HRT	Hydraulische Verweilzeit
HV	Hydroxyvalerat
M.-%	Massenprozent
MCI	Management Center Innsbruck
MID	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser
MS	Mineralsalzmediumsstufe
NaCl	Kochsalz (Natriumchlorid)
Ni	Nickel
NDF	Neutral-Detergenzien-Faser
OLR	Organische Raumbelastung
oTM	Organische Trockenmasse
oTR	Organischer Trockenrückstand
oTS	Organische Trockensubstanz
Pb	Blei
pH	Potential des Wasserstoffs
PHA	Polyhydroxyalkanoate
PHB	Polyhydroxybutyrat
PHBV	Polyhydroxybutyrat-co-hydroxyvalerat
$p\text{O}_2$	Sauerstoffpartialdruck
PP	Polypropylen
SF	Schweregradfaktor
TDH	Thermodruckhydrolyse
TGA	Thermogravimetrische Analyse

TM	Trockenmasse
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanz
VFAs	volatile Fettsäuren
XF	Rohfasergehalt
Zn	Zink
ZSK	Zweischneckenknetter

Einheitenverzeichnis

Einheit	BESCHREIBUNG
°C	Grad Celsius
a	Jahr
d	Tag
g	Gramm
h	Stunde
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
kW	Kilowatt
L	Liter
Mg	Megagramm
mm	Millimeter
Nm³	Kubikmeter, Normzustand, trocken
Pa	Pascal
rad	Radiant
s	Sekunde
t	Tonne

Kurzzusammenfassung des Gesamtvorhabens

Im Forschungsvorhaben Biowaste to Products (BW2Pro) wird die herkömmliche Bioabfallbehandlung zu einer nachhaltigen Bioraffinerie weiterentwickelt und im Pilotmaßstab mit einem Durchsatz von 1 Mg Bioabfall pro Tag umgesetzt. Das Ziel des Vorhabens ist im Rahmen der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg dem Handlungsfeld 3 „Nachhaltige Bioökonomie in industriellen und urbanen Wirtschaftsräumen“ zuzuordnen.

Die bisherige energetische Nutzung durch die Gewinnung von Biogas und die stoffliche Nutzung durch die Verwendung von Gärresten als Düngemittel werden in der Bioraffinerie durch die Produktion höherwertiger Stoffe ergänzt. Mittels einer Kombination innovativer Verfahren werden Bioabfälle aus der kommunalen Sammlung zu einer Reihe stofflicher Produkte mit ökologischem Mehrwert weiterverarbeitet.

Basis des Prozesses ist die Auftrennung der Bioabfälle in eine feste, schwer vergärbare Phase (Fasern) und eine flüssige, leicht vergärbare Phase (Pülpe). Der Auftrennung in die beiden Phasen liegt ein innovatives Aufschlussverfahren mittels Thermodruckhydrolyse und eine vorgelagerte Störstofffeinaufbereitung mit Hilfe eines Hydrozyklons zugrunde. Ein Teil der Pülpe wird zur Biokunststoffproduktion eingesetzt, während der andere Teil im Hochleistungsfermenter zur Biogasproduktion dient und die daraus entstehenden Gärreste zu einem transportfähigen Mehrnährstoffdünger weiterverarbeitet werden. Die Fasern werden zu verschiedenen Produkten wie beispielsweise biologisch abbaubaren Pflanzfaserpflöpfen weiterverarbeitet oder zur Cellulaseproduktion genutzt. Letztere findet prozessintern Anwendung, um die Biogasproduktion zu steigern. Dieser übergeordnete Kreislaufgedanke prägt den gesamten Ablauf interner Prozesse: So wird auch das anfallende Prozesswasser mehrmals im Kreis geführt.

Die Herstellung dieser Produkte und Sekundärrohstoffe aus kommunalem Bioabfall bietet ein vielversprechendes Substitutionspotential für Produkte und Rohstoffe fossilen Ursprungs und trägt zu Ressourcenschonung und regionaler Wertschöpfung im urbanen Raum bei. Zudem reduziert die Rückgewinnung von Nährstoffen die regionale Abhängigkeit von Düngerimporten und fördert die Verringerung von Treibhausgasemissionen.

Der Betrieb der Pilotanlage und die Herstellung der verschiedenen Materialien im Labor- und Technikuksmaßstab sind wissenschaftlich begleitet und einer ökologischen sowie ökonomischen Bewertung unterzogen worden.

Der Aufbau der Pilotanlage ist erfolgreich abgeschlossen und der angestrebte Durchsatz von 1 Mg Bioabfall pro Tag ist erreicht. Es sind verschiedene Produkte und Sekundärrohstoffe entstanden, darunter Biogas, Cellulasen, Polyhydroxyalkanoate (PHA), Fasern, Mehrnährstoffdünger und verschiedene Faserprodukte, wie z. B. Faserpflanzpflöpfe, Vliese oder Briketts.

Das Projekt BW2Pro zeigt eindrucksvoll, dass Bioabfälle effizient in wertvolle Rohstoffe umgewandelt werden können. Die kaskadierende Koppelnutzung dieses Ansatzes steigert die Effizienz des Wertstoff- und Kreislaufwirtschaftskonzeptes. Die gesammelten Erkenntnisse und die erzielten Ergebnisse bilden die Grundlage für eine breitere Anwendung der entwickelten Technologien und Verfahren in der Bioabfallverwertung.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Ziel

Das Projekt Biowaste to Products (BW2Pro) wird vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg finanziert und von der EU kofinanziert und dient - gemäß ‚Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg‘, der nationalen Bioökonomiestrategie sowie der EU-Bioökonomie-Strategie - dem übergeordneten Vorhabenziel der effizienteren Nutzung kommunaler Bioabfälle. Durch optimierte Kaskaden- und Koppelnutzung werden Bioabfälle in höherwertige Produkte und Sekundärrohstoffe weiterverarbeitet, um dadurch ihren ökologischen und ökonomischen Mehrwert zu steigern.

Laut Bioökonomierat ist die Bioökonomie „die wissensbasierte Erzeugung und Nutzung biologischer Ressourcen, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen“ (Bioökonomierat 2016). Dabei gelten Lebens- und Futtermittel als zentrale Bausteine. In diesem Kontext spielt die effiziente Verwertung von Bioabfällen eine wichtige Rolle. Die herkömmliche Bioabfallverwertung, also die Vergärung und Kompostierung, stellt bereits einen grundlegenden Ansatz der Bioökonomie dar, bei dem Bioabfälle als wertvolle Ressource stofflich und energetisch genutzt werden. Die gezielte Optimierung der Bioabfallverwertung durch Umwandlung von Bioabfällen in wertvolle Sekundärrohstoffe trägt dazu bei, die Ressourceneffizienz zu steigern, den ökologischen Fußabdruck weiter zu minimieren und fossile Rohstoffe zu substituieren. Auf diese Weise wird der Übergang in eine nachhaltige und biobasierte Kreislaufwirtschaft gezielt gefördert.

Im Projekt BW2Pro wird die konventionelle Bioabfallbehandlung zu einer Bioraffinerie im Pilotmaßstab mit einem Durchsatz von 1 Mg Bioabfall pro Tag weiterentwickelt. Dabei entstehen aus dem Bioabfall der kommunalen Sammlung sowohl Produkte wie biologisch abbaubare Pflanzentöpfe und Mehrnährstoffdünger als auch Sekundärrohstoffe wie Fasern, Cellulasen, Polyhydroxyalkanoate (PHA) und Biogas mit ökologischem und ökonomischem Mehrwert. Dies gewährleistet eine optimale Kaskadennutzung des Bioabfalls im Sinne der Bioökonomie:

- 1) Fasern aus Bioabfall bieten eine vielfältige Möglichkeit, biobasierte Produkte herzustellen. Exemplarisch werden in diesem Projekt biologisch abbaubare Faserpflanzentöpfe hergestellt, welche Pflanzentöpfe aus Kunststoffen (also aus fossilen Rohstoffen) substituieren und damit das Kunststoffabfallproblem reduzieren können. Weitere Beispiele sind die Herstellung von Pellets und Briketts zu Heizzwecken und von Vliesen und Pappen für die Verpackungsindustrie bzw. für die Landwirtschaft sowie die Beimischung zu Lehmsteinen als nachhaltige Alternative in der Bauwirtschaft oder die Beimischung zu Erden zur Substitution von Torf. Solche biobasierten Produkte gewinnen aufgrund steigender Nachfrage der Konsumenten nach umweltfreundlichen Produkten oder regulatorischer Anforderungen und Umweltauflagen der Industrie an Bedeutung und werden daher mittelfristig auch ökonomisch interessant.
- 2) Die anaerobe Vergärung von Bioabfällen erzeugt Biogas, eine nachhaltige Alternative zu fossilen Brennstoffen. Es besteht hauptsächlich aus Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) und kann zur Strom- und Wärmeerzeugung, als Treibstoff oder nach Aufbereitung ins Erdgasnetz eingespeist werden. Zudem fällt Gärrest als nährstoffreicher Dünger an, der Nährstoffkreisläufe schließt und den Bedarf an synthetischen Düngemitteln reduziert.
- 3) Mit wachsender Weltbevölkerung steigt auch der Nahrungsmittelbedarf und damit der Bedarf an Düngemitteln in der Landwirtschaft. Die vorrangig verwendeten Nährstoffe sind hierbei Phosphor und Stickstoff. Phosphatgestein gilt als kritischer Rohstoff in der Europäischen Union. Außerdem verursacht die Gewinnung von Phosphat erhebliche Umweltauswirkungen. Zur Herstellung von Stickstoffdünger wird Ammoniak aus Luftstickstoff gewonnen, was mit hohem Energieaufwand und damit auch hohem klimarelevanten CO_2 -Ausstoß verbunden ist. Um den Bedarf an Phosphatgestein und mit fossiler Energie gewonnenem Ammoniak zu verringern, werden gezielte Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphat aus Gärrest einer Bioabfallvergärungsanlage untersucht.
- 4) Mit dem Ziel der Europäischen Union, bis 2050 klimaneutral zu werden, steht auch die Kunststoffbranche vor der Aufgabe, nachhaltige Alternativen zu herkömmlichen, fossilbasierten Kunststoffen zu entwickeln. Eine solche nachhaltige Alternative sind Biokunststoffe, die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden. Ein Beispiel für Biokunststoffe ist PHA.
- 5) Cellulasen spielen in der Kaskadennutzung von Bioabfällen eine Schlüsselrolle, indem sie zellulosereiche Materialien im Bioabfall aufschließen. Durch diesen enzymatischen Abbau werden Zucker freigesetzt, die als Ausgangsstoffe für die Produktion von Biogas, Biokraftstoffen, chemischen Grundstoffen und Biopolymeren dienen können. Dies ermöglicht eine stoffliche und

energetische Verwertung der Bioabfälle in mehreren Stufen. Der Einsatz von Cellulasen verbessert somit die Substratverfügbarkeit für nachfolgende Prozesse und trägt maßgeblich zur Kreislaufwirtschaft im Sinne der Bioökonomie bei.

Die verschiedenen o.g. Einsatzmöglichkeiten zeigen, dass die Fortführung des Projektansatzes von BW2Pro einen vielfältigen Mehrwert generieren kann.

1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Finanzierung: Das Vorhaben wird im Rahmen des EFRE-Förderprogramms „Bioökonomie Bio-Ab-Cycling“ durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, gemeinsam mit der EU-Kommission, gefördert.

Know-how: Das Projektkonsortium setzt sich aus neun Partnern (acht Forschungseinrichtungen und einem Unternehmen) zusammen: Universität Stuttgart - Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA), Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie (IGVP), Institut für Kunststofftechnik (IKT), Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER); Universität Hohenheim - Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie (LAB); Hochschule Offenburg (HSO); Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB); Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu); Fa. Novis GmbH (Novis).

Pilotanlage (Standort/Inputmaterial): Die Pilotanlage befindet sich auf dem Gelände der Bioabfallvergärungsanlage der Abfallwirtschaftsgesellschaft Rems-Murr (AWRM) in Backnang-Neuschöntal. Die Bioabfälle als Inputmaterial dieser Pilotanlage stellt die AWRM bereit, die diese wiederum aus dem Einzugsgebiet des eher städtischen Rems-Murr-Kreises bezieht.

Genehmigungen: Für den Bau der Forschungsanlage (Pilotanlage) in Backnang sind vorab eine Baugenehmigung durch das Baurechtsamt Backnang und eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung durch das RP Stuttgart erteilt worden.

1.3 Stand von Wissenschaft und Technik

Mit der Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) und der Pflicht zur getrennten Sammlung von Bioabfällen (BioAbfV) ergibt sich weiterer Forschungsbedarf zur Behandlung von Bioabfall und zur Optimierung von Bioraffinerien.

Schon zum Zeitpunkt der Antragstellung existierten verschiedene, verwandte Vorhaben und Untersuchungen:

- 1) Projekt „URBIOFIN urban refinery“, ist seit 2017 mit internationalem Konsortium unter dem Horizon-2020-Programm gefördert und im September 2020 abgeschlossen worden. Die Anlage in Spanien hat pro Tag 10 Mg der Organikfraktion aus kommunalen Siedlungsabfällen verarbeitet. Ergebnis ist die techno-ökonomische Machbarkeit (auf halbindustriellem Niveau) der Herstellung von biobasiertem Ethanol (für Ethylen), volatilen Fettsäuren (für PHA), biobasiertem Dünger und biobasiertem Methan mittels eines Mikroalgen-Photo-Bioreaktors. (Vgl. Circular Bio-based Europe, CBE JU)
Der Fokus liegt auf der Produktion von Plattformchemikalien und Bioplastik. Allerdings sind in der Anlage in Spanien weder Fasern als Sekundärrohstoff aus Bioabfall zurückgewonnen, noch ist Cellulase produziert worden.
- 2) „CAFIPLA“ ist seit 2020 ebenfalls mit internationalem Konsortium im Programm Horizon 2020 gefördert und im Mai 2023 beendet worden. In diesem Projekt entstehen aus organischen Abfällen zum einen Plattformchemikalien und zum anderen Fasern. Biogas als Teil der Bioraffinerie, z. B. zur Energieversorgung der Prozesse, entsteht hier nicht. Außerdem werden die Fasern in diesem Projekt mit Hilfe von Lösungsmitteln gewonnen, während die Ressourcengewinnung in BW2Pro ausschließlich über physikalische Prozesse erfolgt, die eine Behandlung bei hohen Temperaturen und anschließender Druckentspannung umfassen. Hinzu kommt, dass die Technologien in dem CAFIPLA-Projekt einen maximalen TRL von 5 aufweisen und somit noch nicht die Marktreife erreichen. (Vgl. Circular Bio-based Europe Joint Undertaking (CBE JU))
- 3) Die Fasergewinnung des in Baden-Württemberg seit 2010 laufenden Projektes „Donau-Silphie“ (Donau Silphie GmbH) des Energieparks Hahnennest (Energiepark Hahnennest GmbH & Co. KG) soll in einem aktuellen Projekt eines Biogasanlagenbetreibers großtechnisch umgesetzt werden. Die Biogasanlage im nordwest-mecklenburgischen Lübow-Schimm stellt auf Monovergärung mit der Donau-Silphie um, und das Vorhaben soll 2026 die ersten Fasern aus dem ge-

pressten Silphie-Gärrest als Torfersatzstoff an die Erdenindustrie liefern (Vgl. energiezu-kunft.eu). Bei diesem Projekt kommt allerdings die wesentlich homogenere Energiepflanze Durchwachsende Silphie zum Einsatz, was deutlich weniger Herausforderungen mit sich bringt als der Einsatz von Bioabfall im BW2Pro-Projekt.

- 4) Mit Störstoffen im Bioabfall und deren Entfrachtung mittels Hydrozyklon befassen sich u.a. Thomas Senfter vom MCI und Anna Jank von der Universität Innsbruck. (Vgl. u.a. Senfter 2018 und Jank et al. 2017).
- 5) Das aktuell laufende Projekt WIRE (10.2021 – 10.2025), das von der EU im COST-Förderprogramm gefördert wird, zielt auf die Verbesserung der Kommunikation von Forschungsergebnissen und Fachwissen über Bioraffinerien zwischen Wissenschaft, Industrie und Politik ab.

2 Durchführung des Vorhabens

2.1 Aufgabenstellung, Zielsetzung und Arbeitspakete (AP)

Hauptaufgabe des Vorhabens BW2Pro ist der Aufbau und Betrieb einer Pilotanlage als zentrales Element einer Bioraffinerie zur Verarbeitung von Bioabfällen aus kommunaler Sammlung, mit der sowohl Produkte als auch Sekundärrohstoffe gewonnen werden können. Es handelt sich ferner um eine modulare Bioraffinerie, die dezentral und in Kombination mit anderen Modulen standortunabhängig betrieben werden kann. Die Technologien der Pilotanlage werden auf dem Gelände der Bioabfallvergärungsanlage in Backnang-Neuschöntal der Abfallwirtschaft Rems-Murr (AWRM) als Demonstrationsanlage aufgebaut und dort betrieben, die Module außerhalb der Pilotanlage werden u. a. in den jeweiligen Laboren der Institute bearbeitet. Die Anlagenkomponenten der Pilotanlage sind auf 1 Mg Bioabfall pro Tag ausgelegt.

Genauer besteht die Zielsetzung darin, vier hochwertige Sekundärrohstoffe und zwei fertige Produkte aus Bioabfall durch eine Kombination von verschiedenen Technologien herzustellen. Die Sekundärrohstoffe umfassen Fasern (kurz- und langfaserig), Cellulasen, PHA und Biogas. Die vorgesehenen fertigen Produkte sind biologisch abbaubare, nährstoffreiche Pflanzstöcke (aus den mittleren Fasern) und Mehrnährstoffdünger (aus dem Gärrest nach der Hochleistungsfermentation). Die auf der Pilotanlage produzierten Zwischenprodukte werden von den Projektpartnern in ihren jeweiligen (instituts-)eigenen Laboren im Labor- bis hin zum Pilotmaßstab weiterverarbeitet, untersucht und bewertet. (Vgl. Abbildung 1)

Das Vorhaben BW2Pro gliedert sich in elf Arbeitspakete (APs) bzw. Module, wobei konzeptionelle mit experimentellen Arbeiten kombiniert werden. AP 0 umfasst die Projektkoordination. Die APs 1-4 gehören zur (Primär-)Raffination auf der Pilotanlage (detaillierte Beschreibung der Aufgaben in Kapitel 2.3), die APs 5-7 betreffen die Sekundärraffination im Labor (vgl. Kapitel 2.4) und die APs 8-10 die Bewertung und Öffentlichkeitsarbeit (vgl. Kapitel 2.5). Abbildung 1 zeigt das Verfahrensschema des BW2Pro-Projekts. Der Bioabfall durchläuft zunächst eine Feinaufbereitung und Störstoffabscheidung (AP 1), wird dann in der Thermodruckhydrolyse (TDH) aufgeschlossen und in Fasern und Pülpe separiert (AP 2). Die Fasern werden aufbereitet und zu Produkten weiterverarbeitet (AP 4). Die Hochleistungsfermentation erzeugt aus der Pülpe Biogas (AP 3). Die Rückstände aus der Biogasproduktion dienen der Nährstoffrückgewinnung (AP 6). Aus Fasern und Pülpe entstehen Cellulasen (AP 5). Aus der Pülpe werden im Bioreaktor PHA extrahiert (AP 7.1) und zu Biokunststoffen weiterverarbeitet (AP 7.2). Das Gesamtkonzept wird ökologisch (AP 8) und ökonomisch (AP 9) bewertet. Die Öffentlichkeitsarbeit erfolgt im AP 10. (Siehe Überblick in Tabelle 1). Die jeweiligen Meilensteine der APs sind in Abbildung 58 - Abbildung 60 in Anhang 3 zu finden.

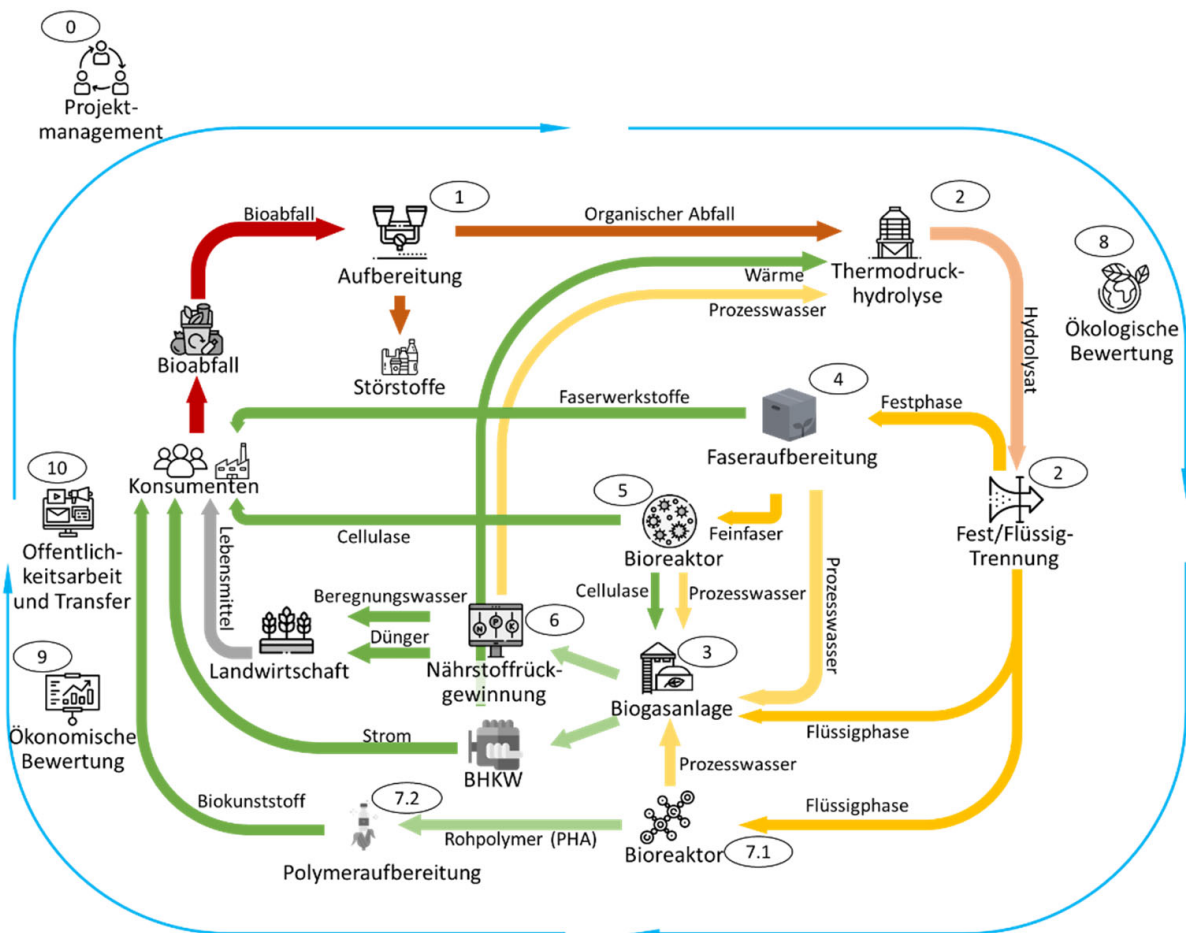


Abbildung 1: Kreislaufschema des BW2Pro-Projekts (Quelle: siehe Anhang 4)

Tabelle 1: Liste der Projektpartner und zugehörigen Arbeitspakete

AP	Aufgabe	Name
0	Projektkoordination	ISWA Uni Stuttgart, LAB Uni Hohenheim
1	Aufbereitung Bioabfall	ISWA Uni Stuttgart
2	Thermodruckhydrolyse	LAB Uni Hohenheim
3	Hochleistungsfermentation	LAB Uni Hohenheim
4	Faseraufbereitung und -nutzung	Novis GmbH
5	Cellulasenproduktion	HSO Hochschule Offenburg
6	Nährstoffrückgewinnung	Fraunhofer IGB
7.1	PHA-Produktion	IGVP Uni Stuttgart
7.2	Polymeraufbereitung	IKT Uni Stuttgart
8	Ökologische Betrachtung	ifeu Heidelberg
9	Ökonomische Betrachtung	IER Uni Stuttgart
10	Öffentlichkeitsarbeit	LAB Uni Hohenheim, ISWA Uni Stuttgart

2.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Projektarbeit erfolgte in folgenden Schritten:

- Planung und Vorarbeiten (10/21 – 11/23)
 - o Einholen der Genehmigungen
 - o Aufstellungsplanerstellung
 - o Bodenbegradigung am späteren Pilotanlagenstandort
- Voruntersuchungen (06/22 – 10/23)
 - o Charakterisierung des Bioabfalls
 - o Vergleiche und Versuche mit herkömmlichen Substraten und Produkten
 - o Laborversuche
- Beschaffung Anlagenteile (06/22 – 06/23)
 - o Marktsondierung im Vorfeld
 - o Aggregatauswahl bzw. Ausschreibungsverfahren
- Aufbau und Inbetriebnahme der Pilotanlage (04/23 – 10/23)
 - o Aufstellen der Anlagenteile gemäß Aufstellungsplan
 - o Test und Nachbesserung der Anlage
 - o Inbetriebnahme
- Betrieb der Pilotanlage (11/23 – 10/24)
 - o Einfahrbetrieb
 - o Betriebsparametereinstellung
 - o Abstimmungen mit den Schnittstellenpartnern
 - o Betriebsparameteroptimierung
 - o Zwischenproduktübergabe an Projektpartner
- Arbeiten der Projektpartner mit den Zwischenprodukten der Pilotanlage (11/23 – 10/24)
 - o Herstellung von Cellulasen
 - o Herstellung von Mehrnährstoffdünger
 - o Herstellung von PHA
 - o Herstellung von Biokunststoffen
 - o Herstellung von Faserprodukten
- Wissenschaftliche Begleitung (06/22 – 10/24)
 - o Probenahmen und -analysen
 - o Datenerfassung, -auswertung und -bewertung
 - o Erstellung von Bilanzen
 - o Identifizierung von Optimierungspotenzialen
 - o Einbettung der Projektergebnisse in die Lehre
- Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit (10/21-10/24)
 - o Vorträge
 - o Informationsveranstaltungen
 - o Berichte/Publikationen
 - o Filmerstellung
 - o Ausstellungen
 - o Pilotanlagenführungen

2.3 Raffination auf der Pilotanlage (AP 1 – 4)

2.3.1 Aufbereitung von Bioabfall und Störstoffabscheidung (AP 1)

Autoren: Steffens, A.; Voßschmidt, D. (ISWA)

Bevor Bioabfälle zu höherwertigen Produkten und Sekundärrohstoffen weiterverarbeitet werden können, müssen diese zunächst aufbereitet werden. Denn im heterogenen Gemisch an Bioabfällen aus der Biotonne befinden sich neben organischen, biologisch abbaubaren Materialien auch Stör- und Fremdstoffe: Zusätzlich zu biologisch (vorwiegend) nicht abbaubaren Kunststoffen, vor allem mineralische Bestandteile (z. B. Sand und Steine), aber auch Glas oder Metalle. Im ersten Prozessschritt wird daher der Bioabfall auf der Pilotanlage aufbereitet und von Störstoffen entfrachtet. Damit soll gewährleistet werden, dass die nachgeschalteten Anlagenteile geschützt und Schäden vermieden werden, der organische Anteil im Bioabfall erhöht und die Prozessstabilität verbessert wird.

Der Bioabfall, der von der AWRM zur Verfügung gestellt wurde, entstammte aus einem eher städtischen Einzugsgebiet und wurde auf der AWRM-eigenen Biovergärungsanlage mit Schredder, Überbandmagnet (Abscheider für ferromagnetische Komponenten) und einem Sternsieb mit Maschenweite 80 mm bzw. 50 mm¹ voraufbereitet.

Zur Vorbereitung auf den Pilotanlagenbetrieb wurde eine Charakterisierung des Bioabfalls über ein Jahr lang vorgenommen. Es sollten, neben Zusammensetzung, Beschaffenheit, Störstoffgehalt sowie physikalischen und chemischen Eigenschaften, vor allem auch jahreszeitliche Schwankungen untersucht werden. Zu diesem Zweck wurde über 12 Monate lang einmal monatlich jeweils eine Arbeitswoche von Montag bis Freitag täglich beprobt, wobei die jeweiligen Wochen jahreszeitlich dem Winter (Dezember – Februar), Frühling (März – Mai), Sommer (Juni - August) und Herbst (September – November) zugeordnet wurden. Die Entnahme erfolgte gemäß Bioabfallverordnung (DIN EN 12579:2013, 2014) an 15 Probenahmestellen eines Bioabfallhaufens. Es wurden etwa 30 l (bzw. 12 kg Bioabfall) pro Probenahme entnommen. Die Proben wurden im institutseigenen Labor auf verschiedene physikalische und chemische Parameter analysiert, eine Mischprobe (je 2 kg jeder Probe über die gesamte Arbeitswoche) wurde zu einem externen Labor verschickt und u. a. auf Nährstoffgehalte analysiert.

Durch die Novellierung der BioAbfV sind Grenzwerte für Kunststoffe im Bioabfall eingeführt worden. Entsprechende Maßnahmen zur Abtrennung von Kunststoffen wurden auf der Biovergärungsanlage getroffen. In der Pilotanlage ging es daher um die Entfrachtung der Schwerfraktion, das sind z. B. Sand, Steine, Glas, Metalle (im Folgenden als ‚Störstoffe‘ bezeichnet). Um dies zu gewährleisten wurde in der Pilotanlage ein Hydrozyklon eingesetzt, der Störstoffe mittels Dichtentrennung abscheidet. Hydrozyklone werden zur Fest-Flüssigtrennung eingesetzt und nutzen eine Kombination aus Flieh- und Strömungskräften zur Abtrennung von Partikeln aus flüssigen Suspensionen (siehe Abbildung 2). Die Funktionalität des Hydrozyklons erfordert die Reduktion der Viskosität des Bioabfalls, denn der Abscheidegrad des Hydrozyklons hängt einerseits von der Durchflussgeschwindigkeit im Zulauf, andererseits aber auch von der Partikelgröße und der Homogenität und Viskosität des Gemischs ab. Gemäß Senfter (2018) erhöht sich die Sedimentationsgeschwindigkeit mit Senkung der Viskosität.

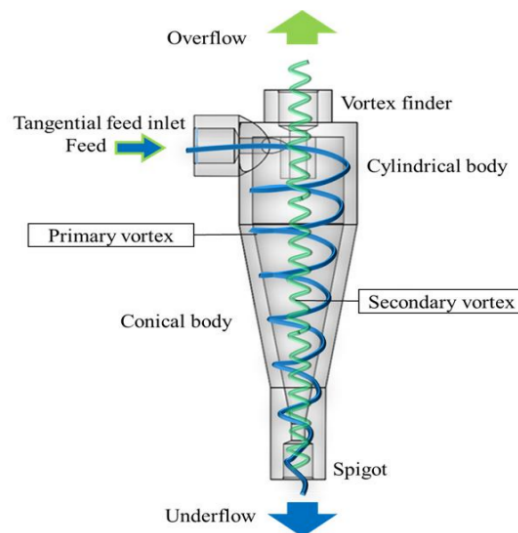


Abbildung 2: Funktionsweise eines Hydrozyklonabscheiders (Quelle: Yi et al. 2021)

Eine optimale Funktionsfähigkeit des Hydrozyklons erfordert neben genügend geringer Partikelgröße einen Wassergehalt des Substrats von über 85 % (bzw. ein TR-Gehalt von unter 15 %), daher ist dem Bioabfall (TR-Gehalt ca. 37 %, bzw. erfahrungsgemäß zwischen 20 - 48 %, Kranert 2017) zunächst eine entsprechende Menge (Prozess-)Wasser zuzusetzen, welches nach der Entfrachtung wieder abgepresst wird. Aus diesem Grunde wurden in der Pilotanlage dem Hydrozyklon eine Zerkleinerungseinheit und ein Rührbehälter mit Wasserzugabe vorgeschaltet. Die für die Pilotanlage benötigten Aufbereitungsaggregate wurden über ein Ausschreibungsverfahren beschafft.

¹ Austausch des 80-mm-Sternsiebs durch ein 50-mm-Sternsieb während des Betriebs der Anlage im Mai 2023

Abbildung 47 (in Anhang 1) zeigt den Aufbau der Zerkleinerungseinheit außerhalb der Halle, bestehend aus dem Wiegemischbehälter, dem Doppelwellenzerkleinerer, der Exzentrerschneckenpumpe und einem Feinzerkleinerer, dem sogenannten RotaCut.

Der RotaCut ist mit Schneidmessern ausgestattet, welche mit konstantem Druck auf ein Schneidsieb (25 mm) gepresst werden und senkrecht zur Fließrichtung rotieren. Dabei werden einerseits größere Schwerstoffe vor dem Sieb abgeschieden und andererseits faserige Feststoffe durch die selbstschärfenden Schneidmesser abgeschert. Der Bioabfall wird in den Wiegemischbehälter aufgegeben, mit Prozesswasser bis zu einem bestimmten TR-Gehalt vermischt, vorzerkleinert und anschließend auf eine bestimmte Korngröße (25 mm) zerkleinert. Die Exzentrerschneckenpumpe befördert die nun zerkleinerte und pumpfähige Bioabfallsuspension (im Folgenden als ‚BA-Suspension‘ bezeichnet) durch Rohrleitungen zur Homogenisierung des Materials in einen Rührbehälter, dem Vorlagetank des Hydrozyklons, innerhalb der Halle der Pilotanlage.

Abbildung 48 (in Anhang 1) zeigt den Aufbau der Aufbereitungsaggregate innerhalb der Halle, bestehend u. a. aus drei Tanks zur Lagerung und Homogenisierung des Bioabfalls (Tank 1 und 2, rechts und Mitte) bzw. des Prozesswassers (Tank 3, links) mit einem effektiven Fassungsvermögen von je etwa 3,2 m³, des Weiteren aus 2 Drehkolbenpumpen zur Beförderung des Materials, aus dem Hydrozyklon sowie aus Rohrleitungen (saugseitig) und Druckschläuchen (inkl. Magnetisch-induktiven Durchflussmessern (MIDs) zur Volumenbestimmung).

Vom Rührbehälter 1 (rechter Tank) wird die BA-Suspension mittels Drehkolbenpumpe (rechte Pumpe) durch den Hydrozyklon in den gleichen Rührbehälter 1 rezirkuliert. Die Rezirkulationsmenge ist dabei abhängig vom Volumen der BA-Suspension, der Abscheidezeit und der Durchflussgeschwindigkeit, die wiederum von der Pumpleistung abhängt. Im Hydrozyklon werden Störstoffe kontinuierlich abgeschieden. Die Durchflussgeschwindigkeit kann dabei variabel von 10-25 m³ h⁻¹ eingestellt werden. In bestimmten Zeitabständen werden die Störstoffe entnommen (z. B. 15/30/60 min). Nach Erreichen der gewünschten Rezirkulationsmenge wird das Material aus Rührbehälter 1 in den Rührbehälter 2 (mittlerer Tank) gepumpt. Von dort aus wird das (weitgehend) störstoffentfrachtete Material zum nächsten Prozessschritt, der Thermodruckhydrolyse, weiterbefördert. (Vgl. Abbildung 49 in Anhang 1)

Die Einstellungen der Betriebsparameter der jeweiligen Aggregate erfolgt größtenteils vom, eigens für dieses Projekt eingerichteten, Schaltschrank. So können die Durchflussgeschwindigkeiten der Exzenter- und der Drehkolbenpumpen, aber auch die Rotationsgeschwindigkeit der Zerkleinerungsaggregate über einen Frequenzumrichter im Schaltschrank gesteuert werden. Die Fördergeschwindigkeit der Schnecke des Wiegemischbehälters kann separat am Wiegemischbehälter eingestellt werden. Die Steuerung des Hydrozyklons (u.a. zum Öffnen und Schließen der Ventile) ist in einem separaten Schaltschrank untergebracht.

Hauptaufgabe des AP 1 ist die Entfrachtung der Störstoffe aus dem Bioabfall mittels Hydrozyklon. Während des Pilotbetriebs wurden verschiedene Betriebsparameter variiert, darunter die maximale Partikelgröße des Bioabfalls, die Zugabemenge des Prozesswassers zur Einstellung des TR-Gehalts, die Abscheidezeit des Hydrozyklons und der Volumenstrom, der durch die Pumpleistung bestimmt wird. Zur Untersuchung der Störstoffe wurde der Glührückstand der Störstoffbehälter nach (Mehrfach-)Durchlauf durch den Hydrozyklon bestimmt (Glühen der trockenen Probe bei 550°C), da davon auszugehen ist, dass die abgeschiedenen Störstoffe den anorganischen Anteil der abgeschiedenen BA-Suspension bilden. Variiert wurde dabei die Bioabfallzusammensetzung, die Durchflussgeschwindigkeit und damit auch die Rezirkulationsmenge. Jeder Versuch wurde an einem anderen Tag durchgeführt und hatte dadurch jeweils eine andere Bioabfallzusammensetzung. Da zudem Stichproben zur Ermittlung der Störstoffmenge im Inputmaterial großen Schwankungen unterliegen, kann der tatsächliche Störstoffgehalt generell nur mit hohem Aufwand oder sehr hoher Ungenauigkeit quantifiziert werden.

Aus diesem Grund und aufgrund der Erkenntnisse im Pilotbetrieb sind weitere Untersuchungen zum Abscheidegrad des Hydrozyklons durchgeführt worden: Dazu wurde ein Substrat (Kraut & Rüben Mash, Josera) verwendet, welches eine vergleichbare Zusammensetzung wie Bioabfall aufweist (Rohfaser 17,7 %, Rohfett 7,7 %, Rohprotein 16,2 %). Diesem störstofffreien Bioabfallersatz wurde eine vordefinierte Menge an Störstoffen (Quarzsand, Dichte etwa 2.700 kg m⁻³) unterschiedlicher Korngrößen (1 – 5 mm) zugefügt. Für diesen Versuch war das Setup der Aufbereitungsanlage zu verändern: Der Rührbehälter 1 (vgl. Abbildung 48 im Anhang 1, rechter Tank) wurde durch ein Absetzbecken ausgetauscht. Dadurch wurde sichergestellt, dass alle Materialien den Hydrozyklon passieren und sich keine Ablagerungen im rechteckigen Rührbehälter bilden. Darüberhinaus wurde eine weitere (Exzentrerschnecken-)Pumpe zur Erhöhung der Durchflussgeschwindigkeit installiert.

2.3.2 Thermodruckhydrolyse: Aufschluss und Separierung (AP 2)

Autoren: Dr. Oechsner, H.; Dr. Hülsemann, B.; Baumgart, M. (LAB)

Rest- und Abfallstoffe weisen einen hohen Fasergehalt auf, der unter anaeroben Bedingungen nur schwer vergärbar ist. Dadurch bleibt bei der rein energetischen Verwertung dieser Stoffe in Biogasanlagen ein erheblicher Teil des Energieinhalts ungenutzt. Ein zentraler Bestandteil der bioökonomischen Landesstrategie Baden-Württembergs (Deutschland) ist es daher, neben der energetischen auch die stoffliche Verwertung organischer Reststoffe zu optimieren. Ziel der Strategie ist es, durch innovative biologische Konzepte erneuerbare und/oder recycelbare Rohstoffquellen zu erschließen. Dies kann unter anderem durch die Abtrennung der Fasern von den energiereicheren Zellinhaltsstoffen erreicht werden. Im Rahmen des BW2Pro-Forschungs- und Demonstrationsprojekts wird das Substrat einer Thermodruckhydrolyse unterzogen, wodurch sich die Fasern aus dem Substrat abtrennen lassen. Diese werden zur Herstellung von Pflanztöpfen, Vliesen und Faserverbundstoffen genutzt. Die verbleibende flüssige Pülpe, die aus leicht abbaubaren Bestandteilen besteht, kann in speziell angepassten Biogasfermentern optimal energetisch verwertet werden.

Zur Realisierung der Ziele der Landesstrategie wurde im Projekt eine Pilotanlage realisiert, die täglich etwa 1 Tonne Bioabfall zur Faser- und Biogasproduktion aufbereiten kann. Die Aufbereitung in dem Konzept wird dabei durch eine Thermodruckhydrolyse (TDH) und einen Entstipper realisiert (vgl. Abbildung 50 in Anhang 1). Die Thermodruckhydrolyse ist ein Verfahren zur Behandlung von Biomasse, bei dem diese in einem geschlossenen Druckreaktor erhitzt wird. Dabei entsteht ein Überdruck entsprechend dem Sattedampfdruck, wodurch die Substratpartikel und Zellen komprimiert werden. Nach einer abrupten Druckentlastung verdampft das in den Zellen enthaltene Wasser schlagartig. Diese plötzliche Entspannung erzeugt Scherkräfte, die glykosidische Bindungen und Wasserstoffbrücken hydrolysieren, während die Dampfausdehnung die Biomassestruktur weiter aufbricht. Durch diese Behandlung werden komplexe Faserstrukturen aufgelöst, organische Nährstoffe freigesetzt und die enzymatische Hydrolyse sowie die anschließende Fermentation erleichtert. Der Grad der Zerkleinerung hängt von der Temperatur, dem resultierenden Druck und der Verweilzeit im TDH-Kessel ab. Der Prozess kann von der Bildung feiner Risse bis zur vollständigen Auflösung der Holzstruktur reichen. Gleichzeitig führt er zur Abtötung aller relevanten pathogenen Keime im Substrat und bewirkt somit dessen Hygienisierung. Im Projekt wurde eine Optimierung der Thermodruckhydrolyse angestrebt, wobei mit Temperaturen von 150, 160 und 170 °C bei Haltezeiten von 15, 30 und 60 min gearbeitet wurde. Bei einer Vielzahl von Untersuchungen mit dem vorbehandelten Bioabfall, wurde der Einfluss der Variationsparameter auf die stoffliche Zusammensetzung der aufbereiteten Substratfraktionen (Faser und Pülpe) analysiert (siehe Abbildung 3).

Zur Bewertung des Einflusses wurde die Faserqualität und der Einfluss auf die Massen- und Energiebilanzen an der Pilotanlage untersucht. Des Weiteren wurde die resultierende flüssige Phase aus dem Prozess (Pülpe) klassifiziert und auf ihre Eignung als Substrat für eine energetische Verwertung in Biogasanlagen untersucht.

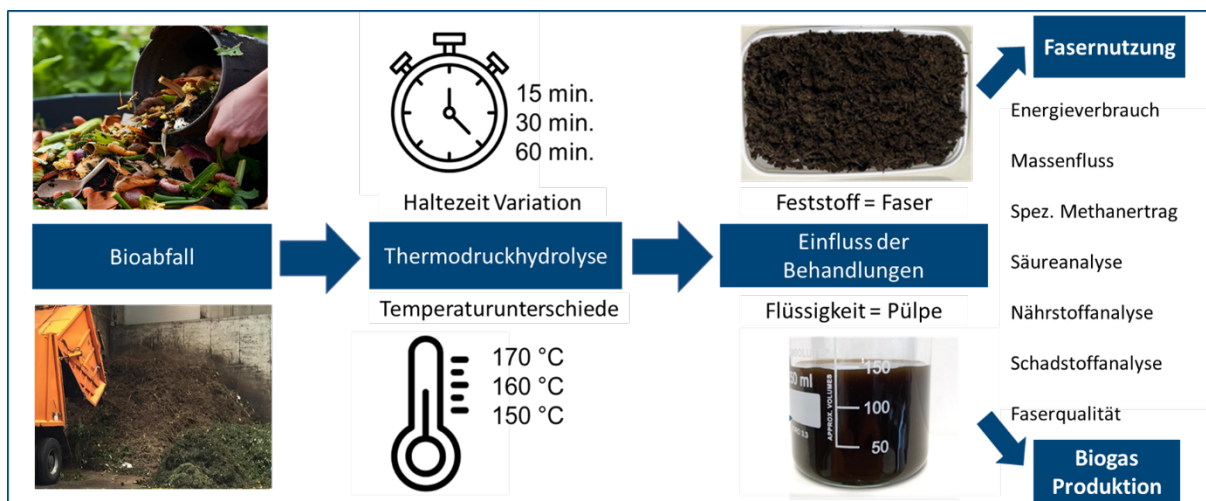


Abbildung 3: Versuchsaufbau an der Thermodruckhydrolyse in Backnang (2024)

Die Pilot-TDH wurde im semikontinuierlichen Betrieb mit einer Substratmenge von 150–200 kg pro Durchlauf getestet. Jeder Versuch umfasste eine Aufheizzeit von einer Stunde sowie die jeweils vorgegebene Haltezeit.

Das Substrat wird über den Fütterungstank mithilfe eines Schneckenförderers in die TDH geleitet. Die Beheizung des Reaktors erfolgt elektrisch durch eine Thermoölanlage über einen Doppelmantel. Nach der Druckentspannung gelangt das Material in einen Ausgleichsbehälter, der als Pulper fungiert (siehe Abbildung 4). Dort wird es mit Wasser zu einer Suspension mit einem Trockenmassegehalt von etwa 5 % vermischt. Diese Verdünnung ist erforderlich, um die Suspension pumpfähig zu machen und sie für die Weiterverarbeitung im nachfolgenden Entstipper (Hueber, HO-G, Kulmbach, Deutschland) vorzubereiten. Im Entstipper erfolgt eine mechanische Bearbeitung der Fasern, wodurch sie weiter zerkleinert und homogenisiert werden. Die Volumenmessung wird über einen Durchflusszähler durchgeführt. Anschließend trennt ein Pressschneckenseparator die aufbereitete Mischung in eine feste (Naturfaser) und eine flüssige Fraktion (Pülpe). Die Masseströme der beiden Produkte werden über Füllstandssensoren und eine Dosierwaage erfasst.

Zur Bewertung der Aufbereitungsintensität in einer Thermodruckhydrolyse hat sich in der Literatur der Schweregrad-Faktor (SF) etabliert. Dieser wird anhand von Temperatur und Verweilzeit nachfolgender Formel berechnet:

$$\text{Schweregrad-Faktor} = R_0 = t [\text{min}] * \exp^{(T [^{\circ}\text{C}] - 100) / 14.75}$$

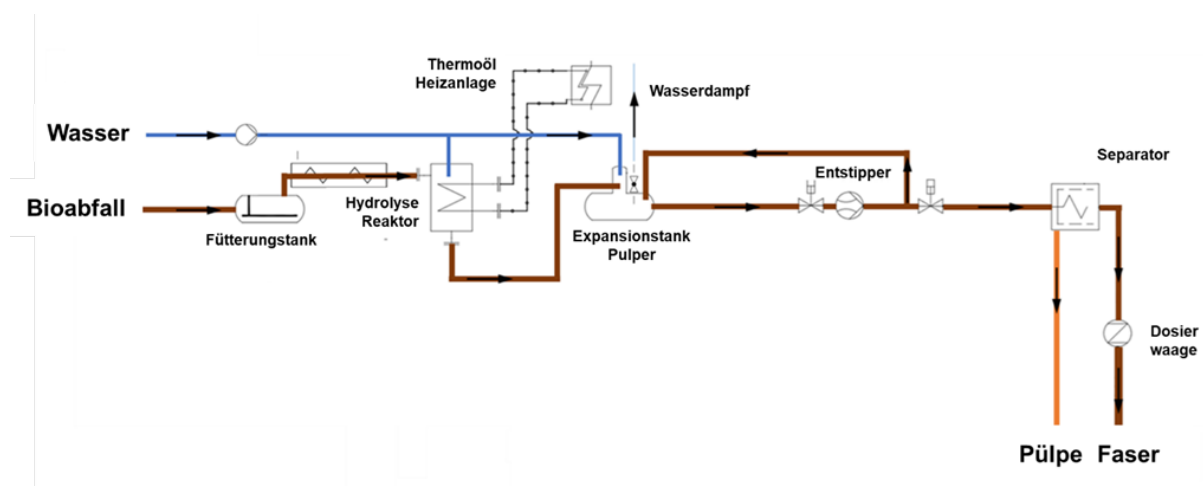


Abbildung 4: Schema der installierten Thermodruckhydrolyse in Backnang (2024)

2.3.3 Hochleistungsfermentation (AP 3)

Autoren: Dr. Oechsner, H.; Dr. Hülsemann, B.; Baumgart, M. (LAB)

Die vom Separator abgetrennte flüssige Fraktion wird in einer innovativen 2-stufigen Biogasanlage verwertet. Diese besteht aus einer volldurchmischten Hydrolysestufe (4 m³) und einem mit Füllkörpern befüllten Festbettreaktor (1,5 m³). Zwischen diesen beiden Fermenterstuken sind zudem zwei redundante Filtrationseinheiten eingebaut, um Feinpartikel abzuscheiden und in die Hydrolysestufe zurück zu führen. Damit kann eine Verstopfung des Feststofffermenters verhindert werden (siehe Abbildung 51 in Anhang 1).

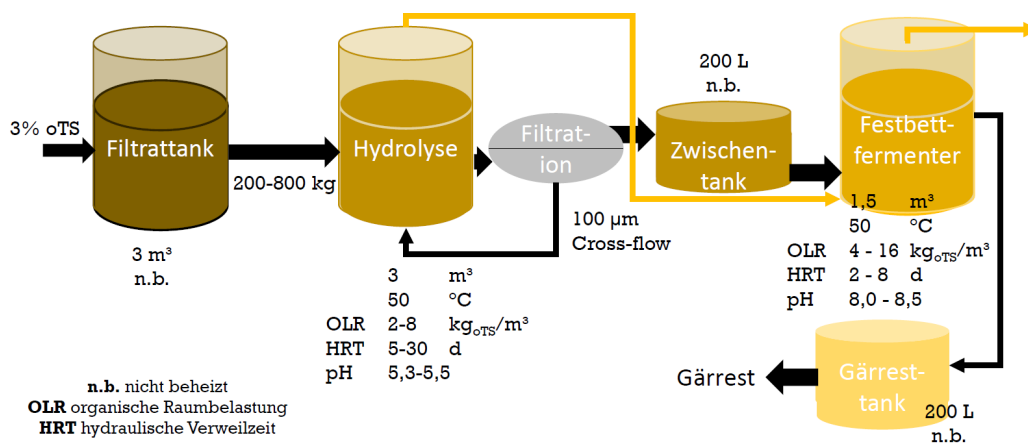


Abbildung 5: Übersicht der Hauptleitungen der Pilotanlage und wichtige Prozessparameter

Zur Aufzeichnung der Fütterungsmengen sind vor der Hydrolyse und dem Festbettreaktor zwei Lagertanks (Filtrattank und Zwischentank) angeordnet. Beide Fermenter werden thermophil bei 50 °C gefahren. Der Hydrolysetank wird im leicht sauren Milieu betrieben um die Methanbildung zu inhibieren. Der Festbettfermenter wird hingegen bei einem pH-Wert von 8,0-8,5 gefahren. Dies ist der optimale Bereich für die methanbildenden Archaeen. Die organische Raumbelastung wird im gesamten System möglichst gesteigert, somit die Verweilzeit möglichst verkürzt, ohne dass der biologische Prozess inhibiert wird. Das Hydrolysegas wird vom Hydrolysereaktor in den Boden des Festbettfermenters eingeblasen (siehe gelber Pfeil in Abbildung 5).

In Abbildung 6 und Abbildung 7 ist die eingebaute Messtechnik im Detail dargestellt, die zur Prozessüberwachung und -einstellung dient. Sämtliche Stoffströme zwischen den Fermentern werden gepumpt. Nur zwischen Festbettfermenter und Gärresttank befindet sich ein freier Überlauf.

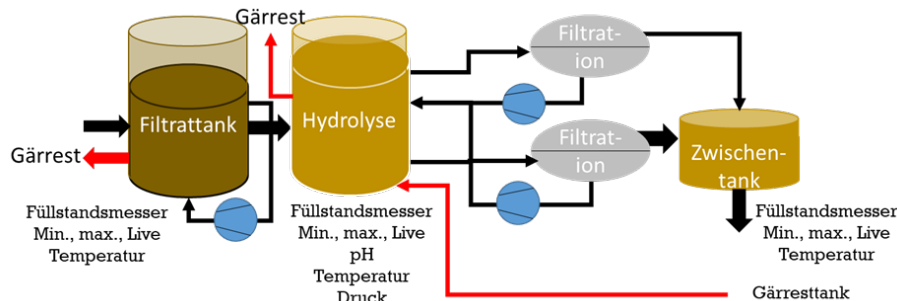


Abbildung 6: Messtechnik und Pumpen im Filtrattank, der Hydrolyse, der Filtration und im Zwischentank

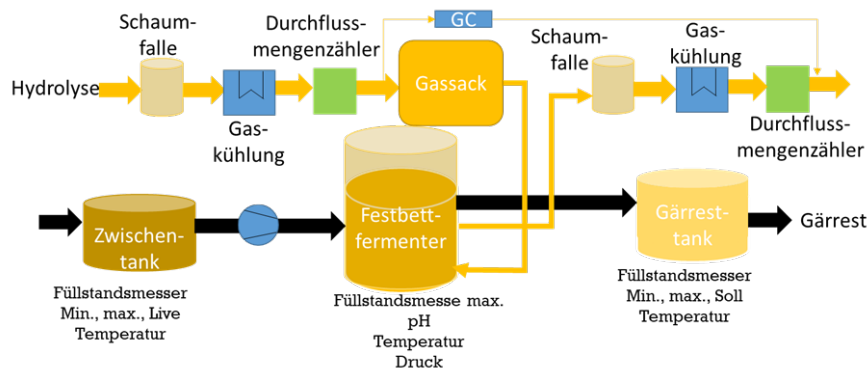


Abbildung 7: Messtechnik und Pumpen im Zwischentank, Festbettfermenter und Gärresttank, sowie die Gasmessstrecken der Hydrolyse und des Festbettfermenters

2.3.4 Faseraufbereitung und -nutzung (AP 4)

Autor: Dr. Helle, T. (Novis)

Ziel der Faseraufbereitung und -nutzung war die Verwertung der aus der TDH separierten Feststofffraktion (Fasern, vgl. Abbildung 9 und Abbildung 55 (im Anhang 1)). Hierfür wurde eine Anlage zur Aufbereitung (Trocknung), Sortierung (siehe Abbildung 56 (im Anhang 1)) und Weiterverarbeitung (hydraulische Presse) auf der Pilotanlage installiert. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Nutzungsmöglichkeiten der Fasern getestet und bewertet. So sollen auf der Anlage mittels Pressform (siehe Abbildung 8) Faserpflanztpfe gepresst werden, welche z. B. für Landesschulen für Gartenbau abgegeben wurden. Proben wurden zudem im hauseigenen Labor der Firma Novis GmbH auf ihre Eignung für die Herstellung von Vliesen und Fasergussformen getestet. Dafür wurden Faserbestandteile in einem Pulper homogenisiert und die daraus entstehende Bütte über Schöpfrahmen zu Formteilen und Vliesen geformt und getrocknet. Die Formteile wurden nach Bedarf anschließend heiß in Form gepresst.

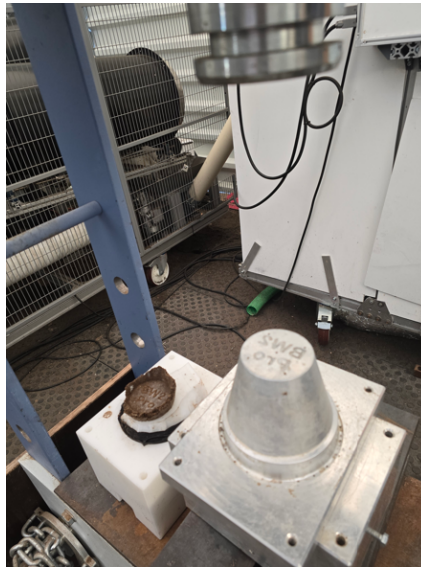


Abbildung 8: Pressformen für Mustertöpfe

Auf Basis der Erfahrungen aus einem vorangegangenen Projekt zur Herstellung von Vliesen aus Biogas-Gärrestfasern sollte die Eignung der langen und mittleren Faserfraktionen zur Vliesherstellung geprüft werden. Die Vliese wurden im Vakuuminfusionsverfahren zu Verbundwerkstoffplatten verwertet. Außerdem sollte geprüft werden, ob die Fasern sich als Zusatz in der konventionellen Bütte zur Herstellung von Formteilen eignen, zu welchem Anteil sie dieser zugefügt werden können und welchen Einfluss dies auf die Produkteigenschaften hat. Ausgangsmaterial für diesen Zweck sind derzeit hauptsächlich Papier- und Kartonabfälle. Darüber hinaus wurden in diesem Projekt weitere Faser-Nutzungsmöglichkeiten getestet und teilweise umgesetzt.



Abbildung 9: Rohmaterial (links), Rohstoff (rechts)

2.4 Sekundärraffination im Labor (AP 5 - 7)

2.4.1 Cellulaseproduktion (AP 5)

Autoren: Dr. Wilke, A.; Zielińska, O. (HSO)

Im Rahmen des Projekts BW2Pro hatte das AP 5 der Hochschule Offenburg die Optimierung der Cellulaseproduktion zum Ziel. Durch die Entwicklung effizienter Verfahren zur Produktion von Enzymen sollte die Grundlage für eine nachhaltige Bioökonomie geschaffen werden. Dabei lag der Fokus auf der Steigerung der Enzymausbeute, der Verbesserung der Nachhaltigkeit durch den Einsatz des Bioabfalls als Kulturmedium und der Reduzierung der Prozesskosten.

Aus dieser Motivation leiten sich die folgenden spezifischen Ziele im AP 5 ab:

- Optimierung der Cellulaseproduktion: Entwicklung effizienter Verfahren zur fermentativen Herstellung von Cellulasen unter Verwendung eines synthetischen Labormediums.
- Erhöhung der Enzymausbeute: Identifizierung und Selektion von hochleistungsfähigen mikrobiellen Stämmen.
- Verwendung der Bioabfallpülpe als Substrat
- Integration in die Biogasproduktion: Untersuchung der Auswirkungen von Cellulasen auf die Biogasproduktion.
- Integration in den Gesamtprozess: Bereitstellung von Enzymen für andere APs und Bewertung der Auswirkungen auf die gesamte Prozesskette.

2.4.2 Nährstoffrückgewinnung (AP 6)

Autoren: Chaumette, C.; Bohn, M. (IGB)

Gärreste von Bioabfällen weisen eine hohe Nährstoffkonzentration auf. Insbesondere auch Phosphat und Ammonium sind in hohen Konzentrationen enthalten. Die Rückgewinnung und Kreislaufführung dieser Ressourcen werden angestrebt. Ziel des AP 6 war es, aus den Gärresten des Hochleistungsfermenters Nährstoffe zurückzugewinnen. Die vorrangige Problemstellung war hierbei die Bilanzierung der Phosphat- bzw. Ammoniumrückgewinnung. Die Hypothese war, dass sich die, im Fermentationsrückstand enthaltenen, Nährstoffe annähernd vollständig, mit einem nachhaltig vertretbaren Ressourcenaufwand, zurückgewinnen lassen und so als werthaltige Einzelfractionen Phosphatsalz und Ammoniumsulfat zur Herstellung von Mehrnährstoffdüngern zur Verfügung stehen.

Referenztechnologie ist die etablierte Lagerung des Flüssiggärrests bis dessen Ammoniakausgasung reduziert ist und die richtige Jahreszeit zur Ausbringung auf Felder der Umgebung anbricht. Hierbei wird der Gärrest monatlich als organischer Mehrnährstoffdünger (RAL-GZ 245) analysiert. Seine Nährstoffzusammensetzung ist jedoch nicht optimal für den landwirtschaftlichen Einsatz, sodass Abnahmekosten für die Vergärungsanlage entstehen. Andere Vergärungsanlagen leiten den Flüssiggärrest kostenpflichtig in lokale Kläranlagen ab.

Die Rückgewinnung von Nährstoffen aus Reststoffströmen wird bereits seit geraumer Zeit untersucht. Vorrangig wurde hierbei bisher die Rückgewinnung aus kommunalen Abwasserströmen und landwirtschaftlichen Restströmen (z.B. Gülle oder Gärresten) untersucht. Der Einsatz aus, von landwirtschaftlichen Restströmen gewonnenen Rezyklaten und daraus hergestellten, Düngern findet in lokalen Nischenmärkten bereits statt. Die Listung von Phosphatpräzipitaten (Component Material Category 12 der Europäischen Düngemittelverordnung) aus Abwasser und Bioabfall aus getrennter Sammlung, eröffnet nun auch größeren Produktionen den europäischen Markt.

Unser Ziel in diesem Projekt war die Übertragung und Nutzung der Erkenntnisse aus der Nährstoffrückgewinnung aus Abwasserströmen und landwirtschaftlichen Restströmen für den Anwendungsfall der Biovergärungsanlage Backnang und der Pilotanlage des BW2Pro-Projekts.

Da repräsentative Fermentationsreste aus dem Hochleistungsreaktor erst zu Projektende zur Verfügung standen und nur geringe Nährstoffgehalte aufwiesen, wurden die Versuche mit den flüssigen Fermentationsresten der Biovergärungsanlage in Backnang-Neuschöntal durchgeführt. Diesem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, dass dieser Gärrest für zahlreiche andere Bioabfallvergärungsanlagen repräsentativ und somit für die Umweltforschung hoch relevant ist. Ferner wurde zu Anfang angenommen, dass der Fermentationsrest aus dem Hochleistungsreaktor eine vergleichbare Zusammensetzung aufweisen könnte.

2.4.3 Biokunststoffproduktion (AP 7)

2.4.3.1 PHA-Produktion (AP 7.1)

Autor: Achenbach, B. (IGVP)

Das IGVP war im Rahmen des AP 7.1 für die Biologische PHA-Produktion, dem Polyhydroxybutyrat-co-hydroxyvalerat (PHBV) verantwortlich. Im Rahmen der Arbeiten wurde das Wachstumsverhalten verschiedener Mikroorganismen in einem parallelisierten Mikrobioreaktorsystem untersucht. Außerdem wurde ein Produktionsprozess etabliert, mit dem erfolgreich verschiedene Quantitäten an Produkten in mehreren Bioreaktormaßstäben produziert werden konnte. Es konnten 100 g, 1 kg und 6 kg Mengen des Rohpolymers an das IKT der Universität Stuttgart übergeben werden. Hierzu wurden 1,4-L, 7,5-L, 42-L, 75-L und ein 1.000-L-Bioreaktor verwendet und damit die Skalierbarkeit des Prozesses gezeigt. Das neu etablierte Aufreinigungsverfahren, welches im Gegensatz zum Literaturstandard ohne halogenierte Lösemittel auskommt, konnte erfolgreich im Labor und Pilotmaßstab durchgeführt werden.

Das IGVP befasst sich seit mehreren Jahren mit der fermentativen Herstellung von Polymeren, dazu gehört PHA. PHA sind intrazelluläre, in Granula eingelagerte Kohlenstoff- und Energiespeicher. Diese dienen Mikroorganismen als Speicher für Hungerphasen und somit als Selektionsvorteil gegenüber anderen Organismen. Hierbei wird PHA von mehr als 300 beschriebenen Bakterienspezies und manchen Archaeen gebildet. Meistens geschieht dies als Reaktion auf Wachstumslimitierung bei gleichzeitigem Überschuss von Kohlenstoffquellen, wobei auch Organismen beschrieben werden, die diese während des Wachstums bilden können (Blunt et al. 2018, Mukherjee und Koller 2023). Während das Homopolymer Polyhydroxybutyrat (PHB), welches von *Cupriavidus necator* auf volatilen Fettsäuren (VFAs) mit gerader Kohlenstoffanzahl und Zuckern gebildet wird, einen Schmelzpunkt nahe der Zersetzungstemperatur und eine hohe Sprödigkeit aufweist, besitzt das Copolymer PHBV einen über den Valeratananteil modulierbare Elastizität und Schmelzpunkt (Huschner et al. 2015, Abbasi et al. 2022). Dieses Copolymer benötigt VFAs mit ungeraden Kohlenstoffanteilen oder Derivaten dieser als Vorstufen.

Im Labor- und Technikumsmaßstab wurde eine zweistufige Vorkulturskaskade, bestehend aus einer Stufe auf Komplexmedium (LB) und einer Mineralsalzmediumsstufe (MS), angewandt. In den Mikrobioreaktoruntersuchungen wurde das Inokulum für die Hauptkultur abzentrifugiert und mit sterilerer NaCl 0.9 %, aq-Lösung resuspendiert, um eine Verschleppung von Kohlenstoff in das Mikrobioreaktorsystem zu verhindern. Hier wurden 168 Fermentationen im 1-mL Maßstab durchgeführt. Jede Substratkonzentration wurde im biologischen Triplikат durchgeführt, was eine Anzahl von 56 getesteten Substratkonzentrationen ergibt. Die Laborfermenter (7-L-, 42-L-, 75-L-Maßstab) wurden mit 5-10 % unverdünnter Vorkultur inokuliert, während in der Pilotierung (1 m³) und entsprechenden Scale-down-Experimenten (1,4 L, 1 L Arbeitsvolumen) eine fünfstufige Vorkulturskaskade angewendet wurde. Die Volumina der Hauptfermenter können der Tabelle 5 entnommen werden. Um den veränderlichen Substratzusammensetzungen und der Vielzahl an organischen Säuren mit unterschiedlichem Inhibierungscharakter gerecht zu werden, wurde eine geregelte Zufütterungsstrategie mit den Regelgrößen Gelöstsauerstoff (pO₂) und pH-Wert etabliert. Hierbei wird eine Bolusfütterung (pulsartige Zufütterung) ausgelöst, wenn ein steigender pO₂-Wert Substratlimitierung anzeigt und eine kontinuierliche Zufütterung über die pH-Regelung erreicht wird (Huschner et al. 2015). Für die PHA-Extraktion wurde die bakterielle Biomasse aus der Fermentation durch Zentrifugation geerntet. Anschließend wurde die Biomasse für die Extraktion getrocknet. Zunächst wurden verschiedene Lösungsmittel auf der Grundlage von Umwelt- und Sicherheitsbewertungen getestet, wobei Alkohol als optimales Lösungsmittel ermittelt wurde. Die Extraktion wurde durch Optimierung des Verhältnisses von Biomasse zu Lösungsmittel und der Extraktionszeit durchgeführt.

Mit diesen Methoden wurden der Fermentationsprozess und das Aufreinigungsverfahren erfolgreich in verschiedene Maßstäbe skaliert.

2.4.3.2 Aufbereitung von PHA (AP 7.2)

Autorin: Dr. Weinmann, S. (IKT)

Eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen, fossilbasierten Kunststoffen sind Biokunststoffe, die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden. Ein Beispiel für Biokunststoffe sind PHA. Der Name PHA steht dabei als Überbegriff für eine ganze Gruppe von Biopolymeren, deren wichtigster Vertreter derzeit das Polyhydroxybutyrat (PHB) ist. Aufgrund seiner Eigenschaften, wie die gute Beständigkeit gegenüber zahlreichen Fetten und Säuren, die guten Barriereigenschaften sowie die gute biologische Abbaubarkeit, selbst unter widrigen Umgebungsbedingungen, wie z. B. im Meerwasser (Bagheri et al. 2017), ist PHB ein vielversprechendes Ausgangsmaterial für neue, umweltschonende Kunststoffe. Der industrielle Einsatz von PHB ist allerdings stark eingeschränkt, besonders wegen seiner hohen Steifigkeit und geringen Dehnfähigkeit. Um dennoch das volle Potential dieses Biopolymers nutzen zu können und es als Alternative für fossilbasierte Kunststoffe, wie z. B. dem Polypropylen (PP), einzusetzen, ist eine Eigenschaftsoptimierung zwingend notwendig, was im Rahmen dieses Forschungsprojektes seitens des IKT durchgeführt wurde. Die anschließende umfassende Charakterisierung der aufbereiteten Biokunststoffe und die sukzessive Optimierung ihres Eigenschaftsprofils dienen dem Ziel, einen marktfähigen PHA-Biokunststoff zu generieren.

Ein Verfahren zur Eigenschaftsoptimierung, das in der Kunststofftechnik häufig genutzt wird, ist die Aufbereitung, welche den mechanisch-verfahrenstechnischen Schritt „vom Polymer zum Kunststoff“ beschreibt. Darunter fallen alle Verfahrensschritte, die erforderlich sind, um aus Polymeren verarbeitbare Kunststoffformmassen mit definierten Eigenschaften herzustellen (Bonten 2020). In Abbildung 10 ist die Prozesskette vom monomeren Rohstoff bis zum fertigen Bauteil schematisch dargestellt.

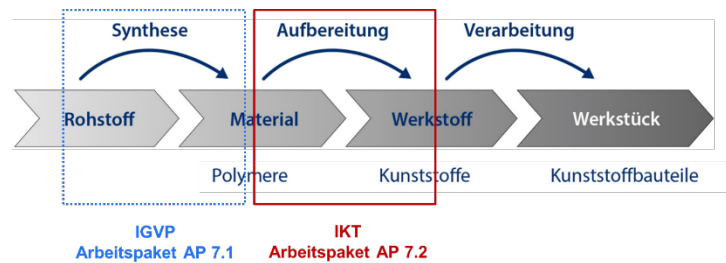


Abbildung 10: Darstellung der Prozesskette vom monomeren Rohstoff bis zum fertigen Bauteil und darin beinhaltet das Teilprojekt des IKT: Modul 8/AP 7.2 „Polymerkonditionierung“

Als Reaktionsaggregat für die Aufbereitung hat sich in der Kunststofftechnik der kontinuierlich arbeitende Doppelschneckenextruder durchgesetzt, nicht zuletzt aufgrund seiner hohen Mischwirkung. Weitere Vorteile liegen gegenüber herkömmlichen Reaktoren in den oft deutlich kürzeren Reaktionszeiten und dass auf den Zusatz von umweltschädlichen Lösungsmitteln sowie Katalysatoren verzichtet werden kann, was den Prozess energie- und kosteneffizienter macht. Auch ermöglicht er ein Upscaling zu industriellen Mengen.

Für die Aufgabe einen marktfähigen Kunststoff auf PHA-Basis herzustellen, der im industriellen Einsatz genutzt werden kann (Modul 8/ AP 7.2), wurden zwei Strategien verfolgt. Zum einen die Aufbereitung von PHB mit biogenen Additiven und zum anderen das Blenden mit einer anderen PHA-Type, die im Rahmen des Projektes vom Projektpartner IGVP/IGB bereitgestellt wurde.

Im Rahmen des ersten Ansatzes wurde zunächst eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um ein geeignetes Additiv auszuwählen. Dabei wurde der Fokus auf biobasierte Additive gelegt (AP 7.2.1). Aufbauend auf den daraus resultierenden Erkenntnissen wurden dem PHB im Rahmen von Aufbereitungsexperimenten mittels eines Doppelschneckenextruders als Reaktionsaggregat ausgewählte Additive beigemischt. Durch die Charakterisierung der modifizierten PHB, konnte im Rahmen eines iterativen Prozesses eine praxisorientierte Evaluation der Additive erfolgen. Des Weiteren fanden fortlaufend Untersuchungen hinsichtlich der Verarbeitungseigenschaften statt (AP 7.2.3). Durch diese Vorgehensweise war es möglich, das Eigenschaftsprofil von PHB sukzessive in Richtung eines industrietauglichen Kunststoffes zu optimieren (AP 7.2.5).

Für die Umsetzung des zweiten Ansatzes zeichnete sich schon früh ab, dass als Blendpartner für PHB das Poly(3-hydroxybutyrat-co-3-hydroxyvalerat) (PHBV) mit einem relativ hohen Valeratanteil verwendet werden sollte, da das Valerat maßgeblich für eine hohe Dehnung ist. Bislang gibt es am Markt jedoch nur ein relativ sprödes PHBV mit einem sehr geringen Valeratanteil (1-8 %), weshalb im Rahmen des Projektes PHBV mit einem sehr hohen Valeratanteil vom Verbundpartner IGVP/IGB synthetisiert und dem IKT fortlaufend in mehreren Chargen zur Verfügung gestellt wurde (Näheres dazu ist dem Teilbericht des IGVP/IGB zu entnehmen). Die verschiedenen PHBV-Chargen wurden dann am IKT umfassend charakterisiert. Zu Beginn des Projektes beschränkte sich die Charakterisierung aufgrund der nur in geringen Mengen zur Verfügung stehenden PHBV jedoch nur auf die Bestimmung der thermischen Eigenschaften, während gegen Ende des Projektes ausreichend PHBV verfügbar war, um eine Kompaktcharakterisierung durchzuführen (AP 7.2.2). Zusätzlich wurden alle PHBV auf deren Eignung zur Verarbeitung mittels Extrusion untersucht (AP 7.2.3). Aufgrund der Tatsache, dass für Aufbereitungszwecke mit einem Doppelschneckenextruder lediglich geringe Mengen an PHBV zur Verfügung standen, wurden erste Compoundierversuche zur Blendherstellung mit einem Minicompounder als Reaktionsaggregat durchgeführt. Dabei wurden Blends ohne den Zusatz von Additiven hergestellt als auch Blends, bei denen mittels geeigneter Kopplungsagenzien eine Teilvernetzung initiiert wurde (AP 7.2.4). Die Herausforderung und zugleich technologische Entwicklung bestand darin, das in seinen Eigenschaften völlig neuartige PHBV in Kombination mit PHB und mittels eines ressourcenschonenden Verfahrens zu einem industrietauglichen Biokunststoff aufzubereiten, der in der Lage ist, fossilbasierte und persistente Kunststoffe, wie z. B. das Polypropylen (PP), teilweise zu ersetzen. Durch eine umfassende Charakterisierung der Blends, erfolgte fortlaufend eine Anpassung der Rezeptur als auch der Prozessparameter, sodass auch mit diesem Ansatz, ein für die Industrie interessanter Biokunststoff entwickelt werden konnte (AP 7.2.5). Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich im Bereich der Einwegverpackungen, aufgrund der guten Barriereigenschaften besonders für Folien im Lebensmittelbereich.

Ausgewählte modifizierte Kunststoffe wurden gegen Ende des Projektes an den Projektpartner ISWA für Bioabbaubarkeitstests übergeben (AP 7.2.6). Ebenso wurden Erkenntnisse und Ergebnisse an die ifeu GmbH zur ökologischen Bewertung weitergeben.

2.5 Bewertung und Öffentlichkeitsarbeit (AP 8 - 10)

2.5.1 Ökologische Bewertung (AP 8)

Autoren: Reinhardt, J.; Veith, C. (ifeu)

Die ökologische Bewertung erfolgte über eine Ökobilanzierung mit Betrachtung der gängigen Indikatoren. Der Bioabfall kommt dabei ohne ökologische Lasten in das System. In den verschiedenen Prozessschritten werden Energie und Betriebsmittel (v.a. Chemikalien) benötigt, deren Bereitstellung mit Lasten verbunden ist. Die erzeugten Produkte können ihre konventionellen Pendanten substituieren, wobei die dadurch eingesparten Lasten dem System gutgeschrieben werden. Weiterhin wird auch die endgültige Entsorgung der Produkte Pflanzstämme und Biokunststoffe sowie der dadurch substituierten fossilen Kunststoffe und Torf mit abgebildet, um diesbezügliche Vorteile biogener Produkte zu erfassen (fossile Kohlendioxidemissionen bei der Verbrennung werden eingespart). Die Nettowerte aus Lasten und Gutschriften können mit anderen Bioabfallbehandlungssystemen verglichen werden.

Die zugehörige Stoffstrommodellierung wurde prozessscharf mit Umberto 11 durchgeführt. Dadurch kann übergreifend aufgezeigt werden, wie die verschiedenen Prozesse miteinander interagieren und welche Prozesskombinationen in welchen frei variierbaren Anteilen das beste Ergebnis liefern.

Folgende Interaktionen bestehen: Die Fasern aus der Thermodruckhydrolyse werden neben ihrer eigentlichen Nutzung zur Pflanztopfproduktion oder als Mulch auch für die Cellulaseproduktion und die interne Zuckerproduktion benötigt, sind aber nur begrenzt verfügbar. Die Pülpe kann sowohl in der PHA-Produktion, der Cellulaseproduktion oder direkt mit hohem Biogaspotenzial in der Vergärung eingesetzt werden. Die intern produzierten Cellulasen können sowohl in der Vergärung als auch für die interne Zuckerproduktion genutzt werden, wobei der Zucker wiederum in der PHA-Produktion verwendet werden kann. Durch die interne Cellulasenutzung lassen sich Aufbereitungsschritte einsparen. Die Biomasserückstände aus PHA-Produktion und Cellulaseproduktion werden mit hohem Biogaspotenzial dann auch in die Vergärung eingebracht, wohingegen die flüssigen organikabgereicherten Rückstände zusammen mit dem Stoffstrom aus der Vergärung in die Nährstoffrückgewinnung gegeben werden. Die Nährstoffe aus der Nährstoffrückgewinnung können wiederum in der Cellulase- und PHA-Produktion eingesetzt werden, so dass auch Transporte eingespart werden. Die Wärme aus der Vergärung (Biogas-BHKW) wird für die Thermodruckhydrolyse, Cellulase-, Zucker-, PHA-, Biokunststoffverarbeitung und Nährstoffrückgewinnung benötigt und lässt sich somit zu einem großen Anteil unabhängig von der Verfügbarkeit eines lokalen Wärmenetzes vollständig nutzen. Für die verbleibende Wärme zur externen Abgabe wird ein Nutzungsgrad von 20 % unterstellt.

Der Betriebsmittel- und Energiebedarf sowie In- und Outputs der verschiedenen Prozesse wurden über komplexe Fragebögen bei den verschiedenen Projektpartnern abgefragt. Die Daten liegen aber nur im Labor- bis (größerem) Pilotmaßstab vor, welche im Vergleich zur standardmäßigen Entsorgung von Bioabfällen bezüglich des spezifischen Energiebedarfs nicht aussagekräftig sind. Zur Aufskalierung wurden Gespräche mit den Projektpartnern geführt.

Dabei wurden zumeist die großtechnisch benötigten Anlagenteile eruiert, für die über Marktangebote Leistungsaufnahme und zugehörige Durchsatzmenge recherchiert werden konnten, um großtechnisch spezifische Energiebedarfe zu berechnen. Teilweise konnten die Projektpartner dazu aufgrund eigener Erfahrungen und Berechnungen auch direkt Angaben machen. Zusätzlich wurden Literaturquellen und eigene Daten herangezogen. Weiterhin ist angenommen, dass jeglicher Wärme- und Dampfbedarf durch interne Wärmerückgewinnung auf 20 % und der Strombedarf für Belüftung in der schon aufskalierten PHA-Produktion weiter auf 10 % reduziert werden kann.

Für die PHA-Produktion gibt es verschiedene Optionen bezüglich Quelle und Wiederverwendung des benötigten Alkohols. Dieser wird hier über fermentativ hergestelltes Ethanol statt über Ethanol aus Ethen approximiert und destillativ unter Wärmeeinsatz rückgewonnen, so dass nur der über die Biomasse in die Vergärung ausgetragene Alkohol neu zugeführt werden muss statt wie sonst nach zweimaliger Nutzung der gesamte Alkohol.

Zur Bewertung des Gesamtsystems wurden verschiedene Szenarien aufgestellt: Um die beste Nutzung der Pülpe zu identifizieren, wurden zunächst „Voll“-Szenarien untersucht, die die Pülpe jeweils vollständig den möglichen Prozessen PHA-Biokunststoffproduktion (Szenario PHA), direkter Vergärung (Szenario Vergärung) und Produktion Cellulasen für den Cellulasemarkt (Szenario Cellulasemarkt CM) zuordnen. Da im zuletzt genannten Szenario die intern verfügbaren Fasern nicht ausreichen, um den anteiligen Bedarf für die Cellulaseproduktion vollständig zu decken, werden zwei alternative Szenarien betrachtet. In diesen werden lediglich 32 % der Pülpe für die Cellulaseproduktion auf dem Markt bereitgestellt, während der verbleibende Anteil entweder der PHA-Produktion (Szenario „Cellulasemarkt CM

intern + PHA“) oder der direkten Vergärung (Szenario „Cellulasemarkt CM intern + Vergärung“) zugeführt wird. In der Cellulaseproduktion wird aber immer unabhängig davon auch externes Weizenstroh benötigt, um die benötigte Glucosemenge bereitzustellen.

Zusätzliche Szenarien zur Nutzung der Pülpe zielen darauf ab, die vollständige interne Verwendung der Cellulasen zu analysieren: Für die Nutzung in der internen Zuckerproduktion können dabei maximal 5,07 % der Pülpe Richtung Cellulaseproduktion gehen: Sowohl die Zucker- als auch Cellulaseproduktion benötigen interne Fasern, wobei hier als Randbedingung festgelegt wurde, dass interner Zucker nur aus intern produzierten Cellulasen und Fasern bereitgestellt wird. Der Rest der Pülpe wird in der PHA-Produktion genutzt (Szenario Cellulase C ZuckerPHA). Für die Nutzung in der Vergärung zur Erhöhung der Biogasausbeute wird optimalerweise 4,5 % der Pülpe Richtung Cellulaseproduktion gegeben und der Rest Richtung direkte Vergärung (Szenario Cellulase C Vergärung). Ein Vergleich mit derselben Cellulasenmenge Richtung Markt (Szenario CMstattCZuckerPHA bzw. Szenario CMstattCVergärung) zeigt, ob die Cellulasen besser intern genutzt oder auf den Markt gegeben werden sollten. Ein Vergleich mit den jeweiligen „Voll“-Szenarien (PHA bzw. Vergärung) zeigt, ob Vorteile durch die Kombination von interner Cellulase mit PHA sowie interner Cellulase mit Vergärung im Vergleich zu PHA und Vergärung ohne internen Cellulaseneinsatz bestehen.

Die Nutzung der Pülpe entscheidet z. T. über die Fasernutzung mit, weil für die Cellulaseproduktion und die interne Zuckerproduktion Fasern abgezogen werden. Die Ergebnisse für die Pülpeszenarien hängen daher wesentlich davon ab, wie hochwertig die verbleibenden Fasern genutzt werden. Als Nutzung der verbleibenden Fasern werden die Produktion von Pflanztöpfen und das direkte Ausbringen als Mulch betrachtet. Bei Pflanztöpfen ergeben sich zwei Szenarien: Substitution von Pflanztöpfen aus 1. fossilen Kunststoffen (PP-Topf), die am Lebensende verbrannt werden, und 2. Torf (Torf-Topf), die wie die Fassertöpfe auf dem Feld verbleiben und dort zu Humusreproduktion und Düngewirkung beitragen.

2.5.2 Ökonomische Bewertung (AP 9)

Autor: Dr. Eltrop, L. (IER)

Die ökonomische Bewertung erfolgte über eine Identifizierung, Analyse und anschließende Bewertung der Teilbausteine (Module) und schließlich des Gesamtkonzeptes der Anlage und ihrer projizierten Zusatzbausteine. Dazu wurden in einem ersten Schritt mit allen Partnerinstituten Gespräche geführt und die Bausteine und Komponenten jedes einzelnen Moduls in einer grafischen und tabellarischen Darstellung aufgelistet und mit Parametern versehen. Hieraus entstanden insbesondere in Zusammenarbeit mit dem ifeu (siehe AP 8) sogenannte Sankey-Diagramme und Übersichten, die den Ablauf, die Komponenten und die jeweiligen Parameter (Mengen, spezifische Mengen und Auslegungen) darstellen. Gleichzeitig wurde an einem ökonomischen Bilanzierungsinstrument gearbeitet, das in Form einer verknüpften EXCEL-Tabelle entstand.

Die Bewertung des Gesamtsystems wurde ebenfalls gemeinsam mit dem ifeu (siehe AP 8) durchgeführt um eine möglichst parallele Bilanz aufzustellen. Dazu wurden verschiedene Szenarien aufgestellt, diese dann ökonomisch bewertet und für das Gesamtsystem Szenarien entwickelt. Da sich in dem Gesamtsystem-Szenario aber zeigte, dass die mit der vorgesehenen Auslegung verknüpften anderen Komponenten nicht zusammenpassen, z.B. die verfügbaren Fasern nicht ausreichen, um den Bedarf für die Cellulaseproduktion zu decken, konnte dieses Szenario nicht ausreichen. Dies traf auch für die Verknüpfung mit der PHA-Produktion zu. So wurde deutlich, dass weitere Szenarien nötig waren, und es wurden zwei weitere alternative Szenarien betrachtet, in denen einerseits die Auslegung der einzelnen Komponenten so angepasst wurde, dass die ausgetauschten Mengen zueinander passen.

Andererseits wurde auch die Frage aufgeworfen und analysiert, ob nicht auch Einzelmodule eine sinnvollere (ökonomische) Variante ergeben.

Die ökonomische Analyse beruhte im Wesentlichen auf der Idee, eine Vollkostenberechnung (der einzelnen Technologien oder Module) durchzuführen, um eine strategische Entscheidung für die Durchführung oder Investition zu treffen. Eine Vollkostenrechnung berücksichtigt alle Kosten, die anfallen. Sie müssen dann auf die einzelnen Produkte oder Leistungen verteilt werden. Bei den Vollkosten unterscheidet man gängigerweise variable Kosten (z. B. Material- und Fertigungskosten) und fixe Kosten (z. B. Mieten, Gehälter). Ziel ist es, die Gesamtkosten des Produkts zu ermitteln, um eine fundierte Preisgestaltung und Wirtschaftlichkeitsanalyse zu ermöglichen. Die Vorteile einer solchen Vollkostenrechnung liegen darin, dass eine umfassende Kostenübersicht erreicht wird und die Produkte oder Verfahren besser preissetzt werden können, da alle Kosten berücksichtigt werden.

In Hinsicht auf die Innovation und Neuigkeit der im BW2Pro-Projekt stehenden Technologien wird anhand dieser Beschreibung bereits deutlich, dass „alle“ Kosten für die Technologien kaum zu erfassen

sind. Es stellte sich im Verlauf der Arbeiten auch heraus, dass die einzelnen Komponenten nur schwer zueinander passten, da die einzelnen Arbeiten von der Biomasse-Aufbereitung, über die Fasererstellung bis zur Cellulase- oder PHA-Produktion auch häufig in separaten Versuchsaufbauten bearbeitet wurden und nicht in der Gesamtanlage verknüpft waren. Die Kostenermittlung in den Gesprächen mit den Partnern ergab, dass die Investitions- und Betriebskosten häufig eher für einzelne Pilot- bzw. Versuchsanlagen galten und nicht für einen kommerziellen Betrieb angesetzt werden konnten. Auch waren viele Technologien und Anlagen auf dem Markt kaum zur Verfügung.

Bei der Ermittlung und Analyse kam es zudem auch immer wieder zu großen Zeitverzögerungen, die auf verspätete Investitionen oder auch Lieferschwierigkeiten zurückzuführen waren. Daraus entstanden folgende Herausforderungen: i) Bei den Kostenanalysen mussten laufend Änderungen berücksichtigt werden, Investitionskosten der Komponenten waren über Listenpreise oder Kennzahlen nur sehr schwer zu bekommen bzw. identifizierbar. ii) Durch die Modularität war ein Zusammenfügen und Abgleich der Module miteinander/untereinander nur schwer möglich, da die Skalierung oder die Frage von zentralen oder dezentralen Aufstellungen oder Mischungen von Pilot- und Laboranlagen nur schwer einschätzbar waren. iii) Für viele Anlagen(teile) gab es keine öffentlich verfügbaren Kostendaten.

Im Bereich der Biomasse-Verarbeitung zu Fasern konnte aber quasi ein „Standard“ definiert werden. Dabei handelte es sich auf Empfehlung von H. Dauser der Fa. Fibres365 GmbH um ein Modul der Anlage „SteamFiber05 mit einem Durchsatz von 5.000 t/a und einer jährlich durchgehenden Betriebszeit (8.400 h/a, 350 d, 24/7 h/d.). Auch die Angaben zu den Investitionskosten für dieses Standardmodul wurden aus den Gesprächen mit H. Dauser entnommen (Abbildung 11). Die weiteren Module wurden so weitgehend wie möglich an diese Mengenauslegung (5.000 t/a) angepasst.

SteamFiber05 investment		
EPC budget		
1	RSE 05 Module	1.435.000,00 €
1	Thermal Oil System (excl. heat source)	323.000,00 €
1	FLS 05 Module (incl. pre-sep)	1.688.000,00 €
total		3.446.000,00 €
<i>price excl. VAT, DAP Germany, cost basis 2024</i>		
<i>price excl.</i>		
<i>feeding/chopping/washing/de-gritting</i>		
<i>fibre packing/drying...</i>		
<i>biogas plant</i>		
<i>civil works, infrastructure</i>		

Abbildung 11: Investitionskosten für SteamFiber05-Standardmodul (Quelle: H. Dauser, Fa. Fibres³⁶⁵ GmbH)

Insgesamt war die ökonomische Analyse eine sehr große Herausforderung, und es standen auch nach intensiver Recherche nur wenig robuste ökonomische Daten zur Verfügung. Zudem hatten die Zeitverzögerungen beim Aufbau der Anlage, bzw. den Einzelkomponenten bei den Partnern einen hohen Zeitverzug zur Folge. Dies führte am IER auch dazu, dass das vorgesehene Personal für die Aufgaben nicht zeitgerecht eingesetzt werden konnte. Darüber hinaus ist es dem IER trotz mehrfacher erneuter Stellenausschreibungen nicht gelungen, ausscheidendes Personal adäquat zu ersetzen und die notwendigen Aufgaben ausreichend zu bearbeiten. Das IER nimmt daher auch nur einen kleineren Teil der bewilligten Mittel in Anspruch und musste einen Teil der Aufgaben, z.B. zur Marktanalyse und des Förderbedarfes, der ökonomischen Bewertung der ökologischen Effekte und der Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzeffekte zurückgeben. Dies wurde auf den Projekttreffen mit den Partnern kommuniziert. Nach gemeinsamer Auffassung hatte diese Einschränkung keine Auswirkungen auf die Arbeit der anderen Partner, da die Aufgaben in AP 9 einen unabhängigen Charakter haben. Dennoch ist diese Entwicklung auch aus IER-Sicht bedauerlich.

2.5.3 Öffentlichkeitsarbeit und Transfer (AP 10)

Autoren: Baumgart, M. (LAB); Steffens, A. (ISWA)

Um die Transformation der Wirtschaft und der Gesellschaft zur Bioökonomie voranzubringen, bedarf es bioökonomischer Ansätze, die realisiert und umgesetzt werden. Neben deren Erfolg hinsichtlich Technologiereifegrad und Wirtschaftlichkeit bedarf es ebenfalls der gesellschaftlichen Akzeptanz. Information und Aufklärung sind die Voraussetzungen dafür, dass neuartige Prozesse und Wertschöpfungsketten verstanden werden, ihre Produkte einen Absatzmarkt finden und damit von der Öffentlichkeit unterstützt werden. Um den Erfolg dieses Ansatzes auch in dieser Hinsicht zu ermöglichen, wurden erst durch die BIOPRO Baden-Württemberg, dann durch das LAB und das ISWA² entsprechende, begleitende Maßnahmen zur Information, Bekanntmachung und Veröffentlichung sowie zum Transfer der Ergebnisse durchgeführt. Ferner wurde zum Projekt eine Homepage³ erstellt, die die Prozessschritte beschreibt, die beteiligten Partner vorstellt, und auf der die aktuellen Erkenntnisse zusammengestellt werden. Zudem wurden Aktionen zur Information der Öffentlichkeit über das Projekt durchgeführt, um die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit auf das Projekt zu lenken und die Basis für weiteren Informationsaustausch zu legen. So wurden die Bioökonomie und speziell der Ansatz dieses Projekts bekannt gemacht und Hemmnisse, die durch mangelndes Wissen verursacht werden, frühzeitig abgebaut. Gleichzeitig kann die Information darüber, dass Bioabfall als Wertstoff angesehen wird und Ausgangsstoff für hochwertige Produkte ist, dazu beitragen, dass die Qualität des gesammelten Bioabfalls steigt. Eine entsprechende Wertschätzung legt auch die Grundlage für die Vermarktung der im Anschluss gewonnenen Produkte. Zu diesem Zweck wurde eine informative Abschlussveranstaltung durchgeführt (u. a. für die breite Öffentlichkeit, Anwender, Brancheninteressierte, Stakeholder aus der Umwelttechnik und Abfallentsorgung). Außerdem wurde ein Imagefilm über das Projekt BW2Pro gedreht, der ebenfalls auf der Homepage verfügbar ist. Auf verschiedenen nationalen Tagungen und internationalen Kongressen sowie durch wissenschaftliche Veröffentlichungen in internationalen wissenschaftlichen Journalen wurde über das Projekt berichtet. Dabei wurden jeweils das Projekt und der Auftraggeber besonders gewürdigt.

2.6 Zeitlicher Ablauf

Das Vorhaben BW2Pro sollte ursprünglich im Zeitraum vom Oktober 2021 bis März 2024 durchgeführt werden. Zwischenzeitlich wurde es um 7 Monate kostenneutral verlängert, so dass das Projekt im Oktober 2024 endete.

Die ursprüngliche Planung sah einen Vorhabensbeginn im Oktober 2021 vor. Erst nach der verspäteten Übersendung des Zuwendungsbescheides (März 2022) konnten die meisten beteiligten Partner Personal für das Projekt einstellen. Die Baugenehmigung konnte bereits nach Erteilung des vorläufigen Bewilligungsbescheides eingereicht werden, der Prozess verzögerte sich jedoch, so dass die Baugenehmigung erst Mitte 2022 erteilt wurde. Globale Material- und Lieferengpässe (Lieferzeiten von >6 Monaten aufgrund der Corona-Pandemie und deren Folgen) und die Notwendigkeit, ein Ausschreibungsverfahren zu wiederholen, beeinträchtigte zudem den Ablauf des Projekts. Hinzu kamen eine zwischenzeitliche Inflation (ausgelöst durch den Ukraine-Krieg) und weitere Lieferengpässe, die zu Teuerungen führten und dazu, dass Komponenten aus Angeboten, die zur Projektantragsstellung eingeholt wurden, nicht mehr lieferbar waren. Die Betriebszeit der Demonstrationsanlage musste dadurch von ursprünglich geplanten zwanzig auf zwölf Monate gekürzt werden, wobei zusätzlich ein 2-monatiger Betriebsstopp aus Frostschutzgründen eingelegt werden musste, der den Einfahrbetrieb unterbrach (Mitte Dezember 2023 – Mitte Februar 2024). Dadurch war ein regulärer Betrieb erst im Frühjahr 2024 möglich. Durch die verkürzte Betriebszeit und den verzögerten Regelbetrieb verzögerte sich vor allem auch die Erledigung aller nachgelagerten APs, da u. a. die Probennahme auf der Anlage nicht entsprechend ursprünglicher Zeitplanung erfolgen konnte.

Die aktualisierte Version des Arbeits- und Zeitplans findet sich im Zwischenbericht vom September 2024.

² Nach dem Ausscheiden der BIOPRO Baden-Württemberg im Frühjahr 2023 übernahm das LAB und das ISWA AP 10

³ www.bw2pro.de

3 Ergebnisse und Bewertung des Vorhabens

3.1 Aufbereitung von Bioabfall und Störstoffabscheidung (AP 1)

Autoren: Steffens, A.; Voßschmidt, D. (ISWA)

Im Hinblick auf den Betrieb der Aufbereitungsaggregate in der Pilotanlage wurde eine Charakterisierung des Bioabfalls durchgeführt und dabei die für den Betrieb relevanten Parameter: TR- und Störstoffgehalte des Bioabfalls untersucht. Dabei gibt der TR-Gehalt des Bioabfalls Aufschluss über die Menge an Prozesswasser, die später beigemischt werden muss, um einen TR-Gehalt von 10-15 % zu erhalten. Der Störstoffgehalt weist auf die Menge an Störstoffen im Bioabfall hin, die im Pilotbetrieb bestenfalls vollständig entfrachtet werden soll. Abbildung 13 (links) zeigt den TR-Gehalt des Bioabfalls über ein Jahr. Dieser schwankt im Jahresverlauf ansteigend von Herbst bis Sommer, wobei im Sommer zwei Ausreißer den Mittelwert nach oben ziehen. Es ergibt sich ein mittlerer TR-Gehalt von ca. 37 % übers Jahr.

Abbildung 12 zeigt den Störstoffgehalt des Bioabfalls bezogen auf den TR-Gehalt - mit einem mittleren Störstoffgehalt von etwa 1 – 2 %, wobei hier (wie Abbildung 52 im Anhang 1 verdeutlicht) mit täglichen (bisweilen deutlichen) Schwankungen zu rechnen ist. Dies weist auf die enorme Herausforderung hin, mit realistischem (Zeit-)Aufwand störstofffreien Bioabfall zu generieren. Bei einem Mg Bioabfall (TR $\approx$ 37 %, Störstoffgehalt = 1 - 2%) sind dies etwa 3 -7 kg Störstoffe, wovon etwa 90 % aus Steinen bestehen. Im Herbst und Winter sind mit geringeren Anteilen an Störstoffen zu rechnen, während im Frühling und Sommer die Störstoffgehalte höher sind. Dies kann mit den jahreszeitlichen Unterschieden in der Abfallzusammensetzung und -menge zusammenhängen. Durch Bodenarbeiten im Frühjahr und Sommer erscheint es plausibel, dass vermehrt mineralische Bestandteile zu diesen Jahreszeiten in die Biotonne gelangen.

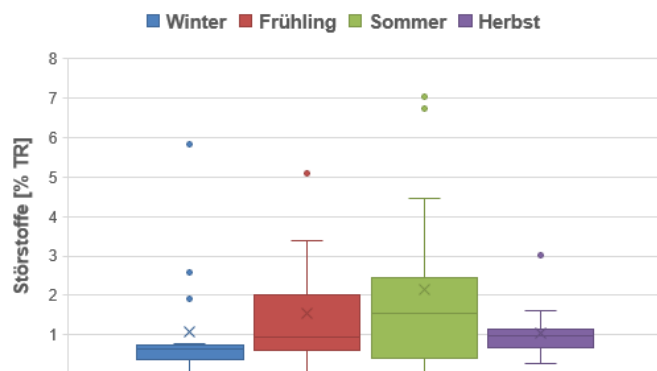


Abbildung 12: Störstoffgehalt des Bioabfalls innerhalb eines Jahres, zugeordnet zu den jeweiligen Jahreszeiten.

Abbildung 13 (rechts) zeigt den mittleren oTR-Gehalt des Bioabfalls, der z. B. für die Biogasproduktion von Bedeutung ist. Dieser ist ebenfalls jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen und zeigt eine ansteigende Tendenz von Frühling bis Winter von etwa 66 % bis 80 % TR. Dies erscheint plausibel aus der unterschiedlichen Zusammensetzung des Bioabfalls in der Biotonne in den verschiedenen Jahreszeiten (z. B. höherer Anteil an Speiseabfällen im Winter gegenüber Garten-/Freilandabfällen, mit mehr Störstoffen im Sommer).

Abbildung 53 (im Anhang 1) zeigt die Konzentration von organischen Säuren (Butter-, Essig-, Propion- und Ameisensäuren). Organische Säuren entstehen durch den Abbau organischer Substanzen und sind ein Hinweis auf mikrobielle Aktivität im Bioabfall. Bezogen auf den Biogasprozess ist die Säurebildung bereits eine vorweggenommene Hydrolyse. Dies hat oTS-Verlust und Geruchsbildung zur Folge. Die Schwankungen lassen sich interpretieren, wenn man beachtet, dass höhere Temperaturen die Mikrobenaktivität und damit die Produktion organischer Säuren beschleunigen, ferner ein hoher Anteil an feuchtem, stickstoffreichem Material (z. B. Rasenschnitt, Küchenabfälle) die schnelle Fermentation und verstärkte Bildung von Essig- und Buttersäure fördert. Buttersäure beispielsweise wird von Clostridien gebildet, die obligat anaerob und bei höheren Temperaturen arbeiten. Dies würde beispielsweise den erhöhten Buttersäuregehalt im Sommer erklären. Niedrigere Temperaturen hingegen verlangsamen mikrobielle Prozesse, wodurch die Säureproduktion insgesamt abnimmt. Außerdem steigt mit mehr laub- und holzartigen Abfällen der Anteil an ligninreicher Biomasse, die langsamer abgebaut wird. (Vgl. dazu auch die Ergebnisse in Kapitel 3.2)

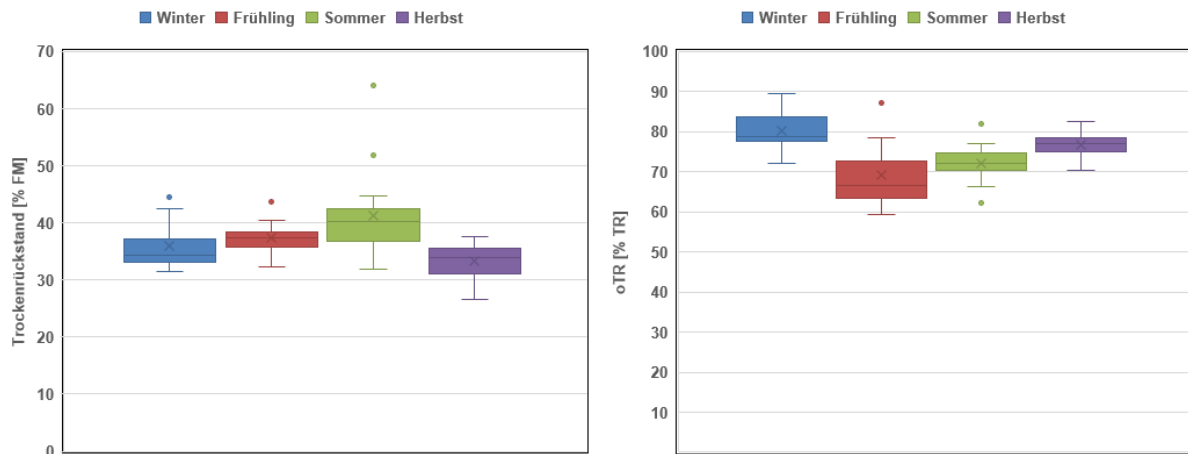


Abbildung 13: TR-Gehalt (links) und oTR-Gehalt (rechts) des Bioabfalls

Abbildung 14 zeigt den Glührückstand für verschiedene Abscheideversuche (A-J und M-N) auf der Pilotanlage, sortiert nach dem Volumenstrom. Die Versuche F-J wurden jeweils mit einem durchschnittlichen Volumenstrom von $13 - 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ durchgeführt und ergaben deutlich weniger Glührückstand als die Versuche mit einem jeweiligen Volumenstrom zwischen 19 und $26 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Dies lässt darauf schließen, dass der Volumenstrom in den Zulauf des Hydrozyklons eine wesentliche Rolle für den Abscheidegrad spielt. Aus diesem Grund wurden weitere Versuche zum Abscheidegrad des Hydrozyklons unternommen.

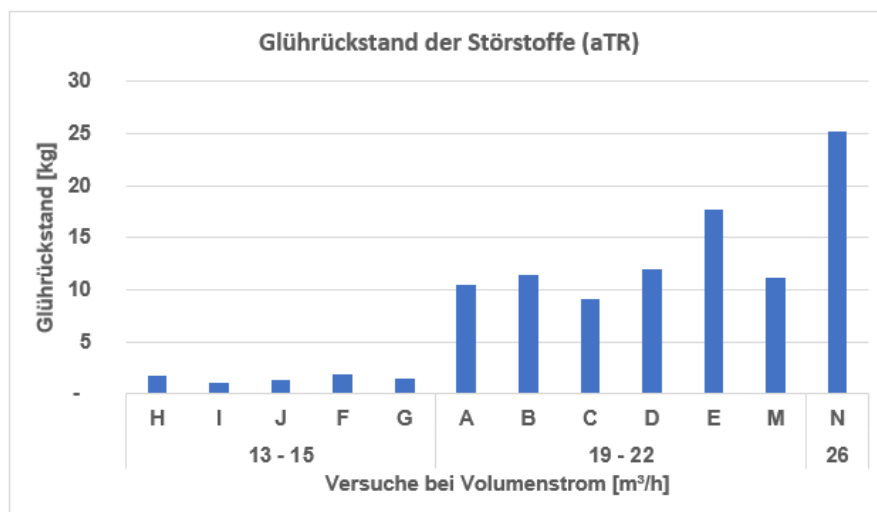


Abbildung 14: Glührückstand der abgeschiedenen Störstoffe aus den Störstoffbehältern

Die Ergebnisse dieser Hydrozyklon-Abscheidegradversuche bestätigen die Hypothese, dass die Durchflussgeschwindigkeit eine bedeutende Rolle bei der Abscheideleistung des Hydrozyklons spielt. Während die Abscheideleistung bei einem Volumenstrom von $20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ bei 50 % liegt, werden bei einem Volumenstrom von $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ca. 90 % der Steine aus der synthetischen BA-Suspension entfrachtet (vgl. Abbildung 15 bzw. Tabelle 2). Ähnliche Untersuchungen von Jank et al. (2017) bei Bioabfall-Klärschlamm-Gemischen ergaben einen Hydrozyklon-Abscheidegrad von 70-80 % für Partikel $> 2 \text{ mm}$ und bei Bioabfall-Suspensionen einen Hydrozyklon-Abscheidegrad von 80-90 % für Partikel $> 0,5 \text{ mm}$. Allerdings waren hier der TR-Gehalt des Bioabfall-Klärschlamm-Gemisches mit etwa 3 %, der TR-Gehalt der Bioabfall-Suspension mit 5 % geringer und die Durchflussrate mit $360 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ bzw. $126 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ deutlich höher als im Projekt BW2Pro. Tabelle 2 zeigt auch, dass bei einem höheren Volumenstrom eine bessere Abscheidung der Feinfraktion zu erkennen ist. Die Versuche zum Abscheidegrad des Hydrozyklons bieten Ansätze zu weiteren Untersuchungen. So könnten u. a. der Abscheidegrad in Abhängigkeit der Korngröße, des TR-Gehaltes oder der Abscheidezeit bestimmt werden. Aufgrund der oben beschriebenen verkürzten Betriebszeit der Anlage konnten diese Versuche jedoch leider nicht mehr während der regulären Projektlaufzeit durchgeführt werden.

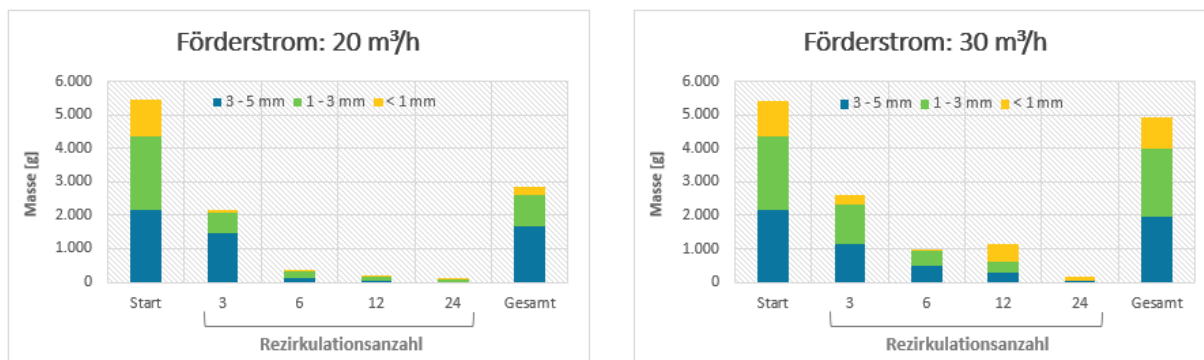


Abbildung 15: Abscheidegrad des Hydrozyklons bei einer Fördergeschwindigkeit von 20 m³/h (links) und 30 m³/h (rechts)

Tabelle 2: Vergleich der Abscheidegrade des Hydrozyklons in Abhängigkeit des Förderstroms

Korngröße Quarzsand [mm]	Abscheidegrad bei 20 m³/h [%]	Abscheidegrad bei 30 m³/h [%]
3,0 – 5,0	77	91
1,0 – 3,0	42	92
≤ 1,0 mm	24	88
Gesamt	50	90

In Abbildung 54 (in Anhang 1) ist die Massenbilanz der Aufbereitungsstufe auf der Pilotanlage für die Aufbereitung von 700 kg Bioabfall dargestellt. Bei einem TR-Gehalt des Bioabfalls von ca. 37 % werden etwa 2 m³ Prozesswasser beigemischt. Die erste Störstoffabscheidung erfolgt im RotaCut durch Stoffe, die das 25-mm-Sieb nicht passieren (inkl. Prozesswasser). Aus dem Hydrozyklon werden nach mehrmaliger Rezirkulation (Rezirkulationsmenge: ca. 20.000 m³) insgesamt ca. 100 kg der BA-Suspension ausgeschleust (davon ca. 12 kg Störstoffe (aTR)). Nach Entwässerung der BA-Suspension bleiben knapp 550 kg Bioabfall, der zur Weiterverarbeitung zur TDH befördert wird. Das Prozesswasser wird im Kreis geführt und der nächsten Charge Bioabfall zugefügt.

Trotz der vielversprechenden Ergebnisse gibt es Optimierungspotentiale hinsichtlich der Aufbereitungsstufe. Beim Betrieb der Aufbereitungsaggregate stieß man wiederholt auf Herausforderungen, die mit Verbesserungen bei den Anlagenkomponenten und den Betriebseinstellungen besser gemeistert werden könnten. Verbesserungsvorschläge sind u. a.:

- Größere Tankvolumina und Redundanzen durch zusätzliche Tanks
- Pumpenverschleiß verringern durch den Einsatz robusterer Pumpen (z. B. Exzentrerschneckenpumpen)
- Erhöhung des Volumenstroms durch leistungsstärkere Pumpen (Durchflussgeschwindigkeit > 25 m³ h⁻¹)
- Austausch rechteckiger Lagertanks durch runde Absetzbehälter mit Rührwerk (Homogenität und weniger/keine Ablagerungen)
- Erweiterung der Zerkleinerung durch weiteren Feinzerkleinerer (RotaCut) mit geringerem Siebdurchgang (25 mm -> 12 mm)
- Höherer Grad der Automatisierung für einen erleichterten Betrieb (SPS-Steuerung)
- Steigerung des Volumenstroms und Reduzierung des TR-Gehalts (Betriebseinstellung)

3.2 Thermodruckhydrolyse: Aufschluss und Separierung (AP 2)

Autoren: Dr. Oechsner, H.; Dr. Hülsemann, B.; Baumgart, M. (LAB)

1) TS-Bestimmung an der TDH

In Tabelle 3 ist der Trockenmassegehalt in Abhängigkeit vom steigenden Schweregrad-Faktor (vgl. Kapitel 2.3.2) dargestellt. Es zeigt sich, dass die verschiedenen Behandlungsbedingungen und Einstellungen der TDH einen signifikanten Einfluss auf den Trockenmassegehalt der resultierenden Faser und Pülpe haben. Aufgrund dessen, dass Wasser verdampft, führt eine intensivere Behandlung mit höherer

Temperatur und längerer Verweilzeit (SF > 3,5) in der TDH zu einem höheren TS-/oTS-Gehalt sowohl in der Faser als auch in der Pülpe.

Tabelle 3: Ergebnisse aus der Analyse des Trockenmassegehaltes über die untersuchten Schweregradfaktoren (SF-Faktor) und damit Behandlungen an der TDH. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für $p < 0,05$ TUKEY HSD/KRAMER

Trockenmassegehalt			Input Bioabfall	sep. Feststoff Bioabfall	sep. Pülpe Bioabfall
Behandlung	SF-Faktor	% TM			
150_15	2.65	% TM	29.55 ± 2.27 c	32.53 ± 3.17 d	2.31 ± 0.42 e
150_30	2.95	% TM	33.62 ± 3.51 ab	35.42 ± 2.78 cd	3.08 ± 0.57 cd
150_60	3.25	% TM	34.41 ± 4.39 ab	35.84 ± 1.06 cd	3.54 ± 0.72 bcd
160_15	2.95	% TM	31.40 ± 2.65 bc	34.75 ± 2.24 cd	2.87 ± 0.15 de
160_30	3.25	% TM	36.69 ± 1.16 a	39.18 ± 1.90 abc	3.73 ± 0.35 abc
160_60	3.55	% TM	35.53 ± 3.44 ab	38.77 ± 1.26 abc	3.68 ± 0.06 abc
170_15	3.25	% TM	33.92 ± 1.68 abc	36.84 ± 3.14 bc	3.90 ± 0.05 abc
170_30	3.55	% TM	36.25 ± 0.87 a	40.51 ± 1.42 ab	4.46 ± 0.20 a
170_60	3.85	% TM	35.59 ± 0.83 ab	41.89 ± 1.61 a	3.84 ± 0.09 ab

2) Bestimmung des Rohfasergehaltes über die unterschiedlichen Einstellungen an der TDH

In Tabelle 4 ist der Rohfasergehalt (XF) über die untersuchten Versuchsvariationen dargestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse aus der Analyse des Rohfasergehaltes in der Trockenmasse über die untersuchten Behandlungen an der TDH. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für $p < 0,05$ TUKEY HSD/KRAMER

Rohfasergehalt XF			Input Bioabfall	sep. Feststoff Bioabfall	sep. Pülpe Bioabfall
Behandlung	SF-Faktor	% TM			
150_15	2.65	% TM	32.07 ± 1.18 b	-	-
150_30	2.95	% TM	-	43.78 ± 2.58 d	14.79 ± 3.04 b
150_60	3.25	% TM	-	46.23 ± 0.62 cd	17.84 ± 1.14 c
160_15	2.95	% TM	-	50.96 ± 2.21 ab	19.79 ± 0.63 bc
160_30	3.25	% TM	-	51.05 ± 1.62 ab	20.01 ± 1.15 bc
160_60	3.55	% TM	-	48.37 ± 2.90 bc	20.91 ± 1.19 abc
170_15	3.25	% TM	-	48.76 ± 0.75 bc	24.15 ± 1.41 a
170_30	3.55	% TM	-	49.81 ± 0.81 abc	20.32 ± 0.26 abc
170_60	3.85	% TM	-	52.99 ± 1.52 a	22.00 ± 1.10 ab
170_60	3.85	% TM	-	51.71 ± 2.53 ab	24.60 ± 1.33 a

Mit steigenden Schweregrad-Faktor steigt der Rohfasergehalt in der festen Fraktion an. Besonders die Varianten mit schwächerer Behandlung (150_15, 150_30) weisen den niedrigsten Fasergehalt sowohl in der finalen Faser als auch in der Pülpe auf. Durch die intensivste Aufbereitung (SF-Faktor 3,84) bei 170°C und 60 Minuten konnte der Rohfasergehalt der separierten festen Phase um 18,11 % (51,71 $\pm$ 2,53) im Vergleich zur Variante bei 150°C und 15 Minuten mit einem SF-Faktor von 2,65 (150_15) gesteigert werden (siehe Tabelle 4).

3) Ergebnisse zum Gehalt an Fettsäuren von Input und Outputfraktionen bei den untersuchten TDH-Varianten

- Gehalt an Milchsäure:

In Abbildung 16 sind die Milchsäuregehalte in der Trockenmasse dargestellt. Die Milchsäure wurde insgesamt effektiv abgetrennt und in die Pülpe überführt: Aufgrund der Verlagerung in die Pülpe kann das in den Säuren enthaltene energetische Potential erschlossen werden. Dies ist sehr wünschenswert, da Säuren anaerob vollständig abgebaut werden können und somit ein hohes Potential besitzen. Der Säuregehalt wird dabei stärker vom Inputmaterial als von den Versuchsvariationen und den Einstellungen an der Thermodruckhydrolyse beeinflusst.

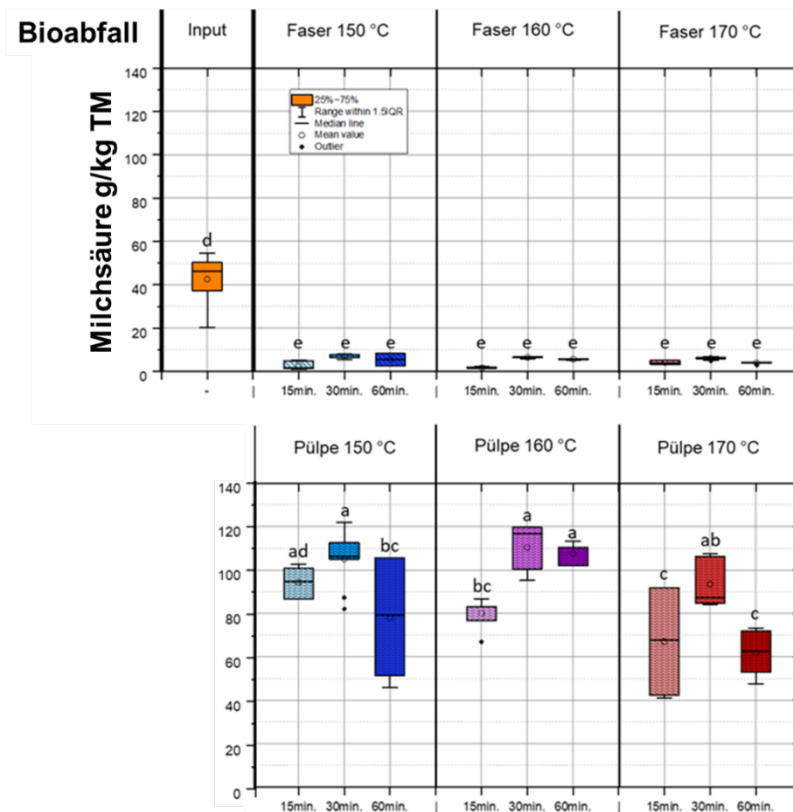


Abbildung 16: Milchsäure in der Trockenmasse über die untersuchten Temperatur- und Haltezeiteinstellungen (angegeben in Minuten) an der TDH. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für $p < 0,05$ TUKEY HSD/KRAMER

- Gehalt an Essigsäure:

Die Thermodruckhydrolyse spaltet unter hohen Temperaturen (ca. 150 – 170 °C) und hohem Druck (6 – 10 bar) organische Verbindungen, insbesondere Polymere wie Lignocellulose oder Proteine, in kleinere Moleküle. Dabei werden Kohlenhydrate teilweise zu Zucker und organischen Säuren abgebaut. Ein wichtiger Prozess in diesem Zusammenhang ist die Bildung von Essigsäure, die auf zwei Hauptmechanismen zurückzuführen ist. Zum einen entsteht Essigsäure durch die Hydrolyse von Acetylgruppen in Hemicellulosen. Diese enthalten gebundene Acetylgruppen, die sich bei hohen Temperaturen als Essigsäure (CH_3COOH) lösen. Zum anderen trägt der Abbau von Glucose und anderen Kohlenhydraten zur Bildung von Essigsäure bei. Hierbei entstehen Zwischenprodukte wie 5-Hydroxymethylfurfural (HMF), die durch weitere Reaktionen zu Essigsäure umgewandelt werden können (Dröge et al. 2023, Lindorfer et al. 2010, Brodtkorb 2008). Es konnte insgesamt ein Anstieg des Essigsäuregehaltes in der Frischmasse nach der Bearbeitung nachgewiesen werden (+87 %). Die entstandene Essigsäure wurde dabei zum überwiegenden Teil in die Pülpe (Abbildung 17) verlagert.

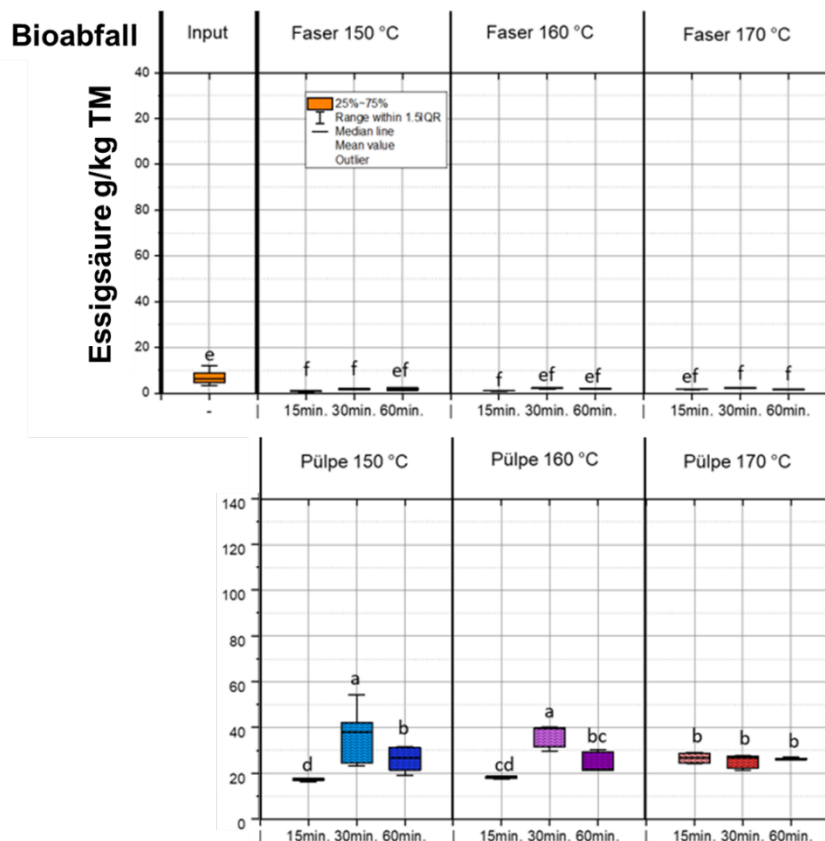


Abbildung 17: Essigsäuregehalt in der Trockenmasse über die untersuchten Temperatur- und Haltezeiteinstellungen (angegeben in Minuten) an der TDH. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für $p < 0,05$ TUKEY HSD/KRAMER

- Gehalt an Buttersäure:

Die Buttersäuregehalte sind insgesamt als gering einzustufen und konnten nahezu vollständig in die Pülpe verlagert werden. Die Faser enthält unter $>0,4 \text{ g kg}_{\text{TM}}^{-1}$ Buttersäure. Dies ist interessant, da Buttersäure olfaktorisch als unangenehm wahrgenommen wird. Aufgrund der geringen Mengen ist die Faser nahezu geruchsneutral.

4) Ergebnisse zum Methanertrag der verschiedenen abgetrennten Fraktionen über die unterschiedlichen Einstellungen an der TDH

- Spezifischer Methanertrag:

Der spezifische Methanertrag im Inputmaterial beträgt $265 \pm 16 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ kg}_{\text{OTM}}^{-1}$, bei der Faser $217 \pm 16 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ kg}_{\text{OTM}}^{-1}$ und bei der Pülpe $336 \pm 17 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ kg}_{\text{OTM}}^{-1}$. Dies zeigt, dass, wie erhofft, durch die Aufbereitung kurzkettige und energiereiche Zellinhaltsstoffe in die Pülpe überführt werden und der energetischen Verwertung zukommen (vgl. Abbildung 19).

5) Ergebnisse der Untersuchung der Pülpe auf Schwermetalle und damit Ausbringung als Düngermittel

In Abbildung 20 bis Abbildung 22 sind die Schwermetallgehalte der resultierenden Pülpe dargestellt. Die zugrunde liegenden Grenzwerte stammen aus dem Praxisleitfaden für die rechtliche Vermarktung und Inverkehrbringung von Düngern, Abwässern und Abfällen (Umwelttechnik BW). Die Ergebnisse zeigen, dass die Pülpe, bzw. das Abwasser aus dem TDH-Prozess, weit unterhalb der vorgegebenen Grenzwerte liegt und somit bedenkenlos auch nach der Vergärung in der Biogasanlage als Gärprodukt bzw. als Dünger ausgebracht werden kann.

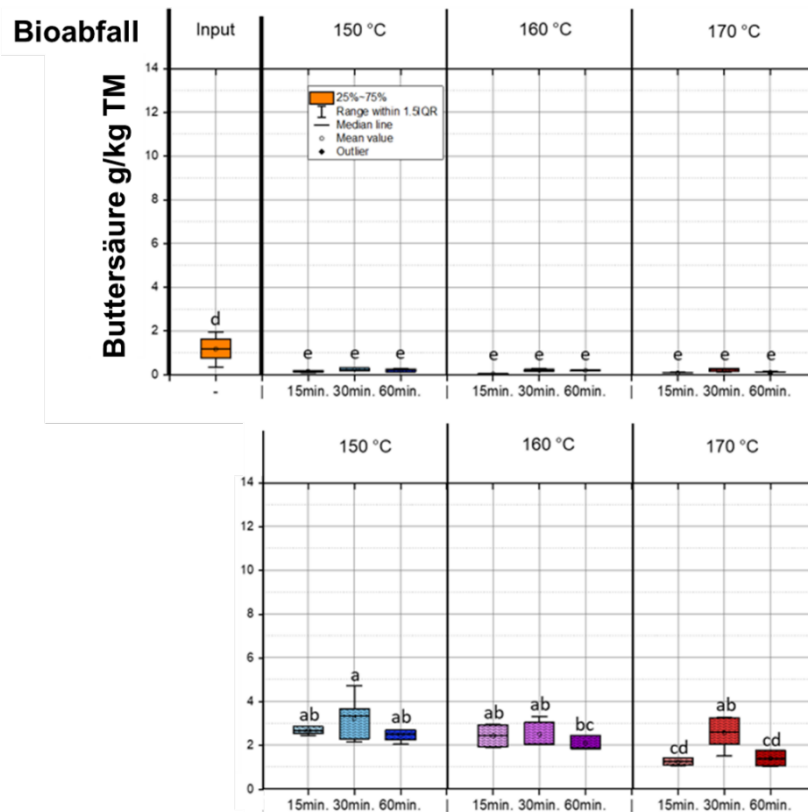


Abbildung 18: Buttersäuregehalt in der Trockenmasse über die untersuchten Temperatur- und Haltezeiteinstellungen (angegeben in Minuten) an der TDH. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für $p < 0,05$ TUKEY HSD/KRAMER

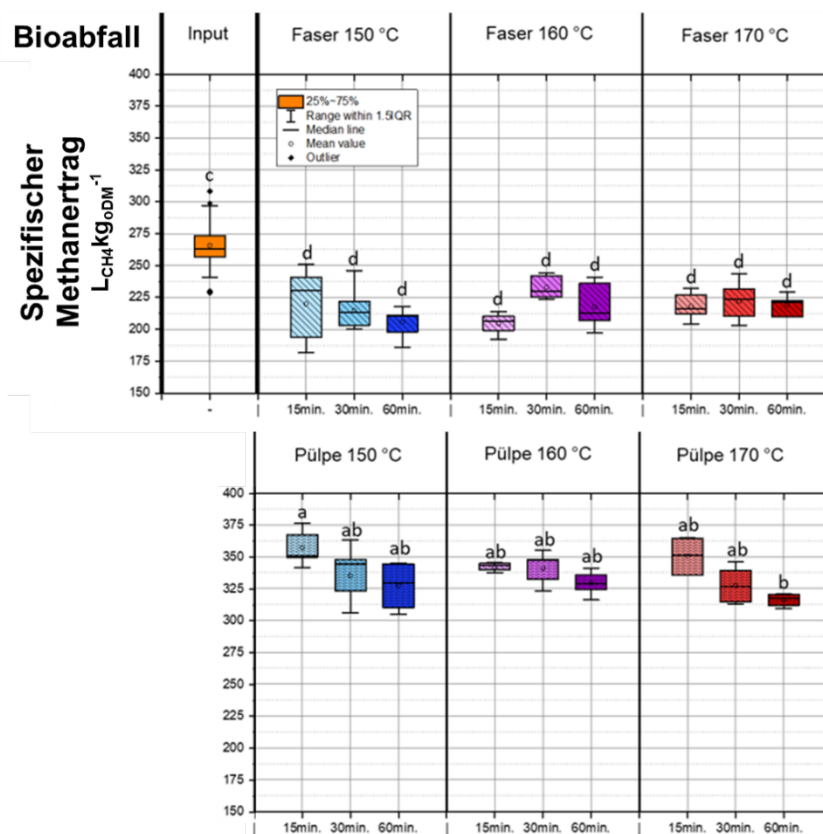


Abbildung 19: Spez. Methanertrag in der org. Trockenmasse über die untersuchten Temperatur- und Haltezeiteinstellungen (angegeben in Minuten) an der TDH. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für $p < 0,05$ TUKEY HSD/KRAMER

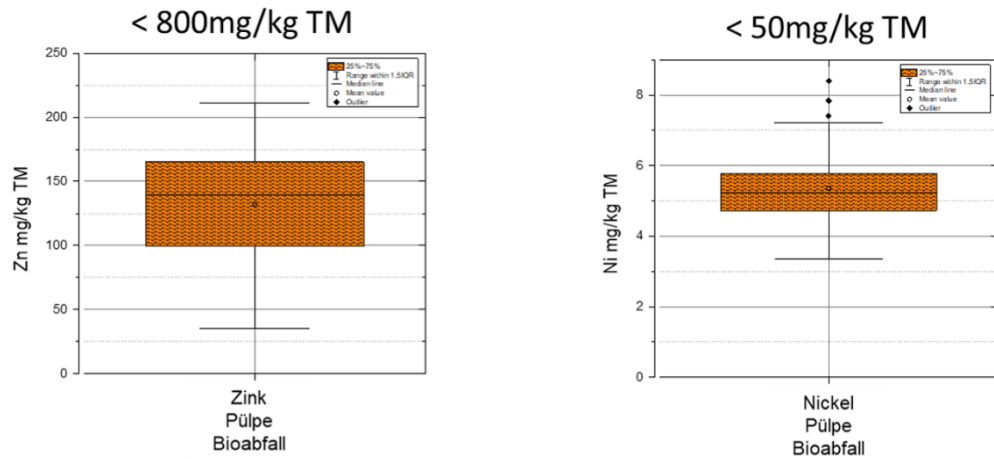


Abbildung 20: Untersuchung von toxischen Stoffen in mg/kg Trockenmasse in der abgetrennten Pülpe: Zink und Nickel

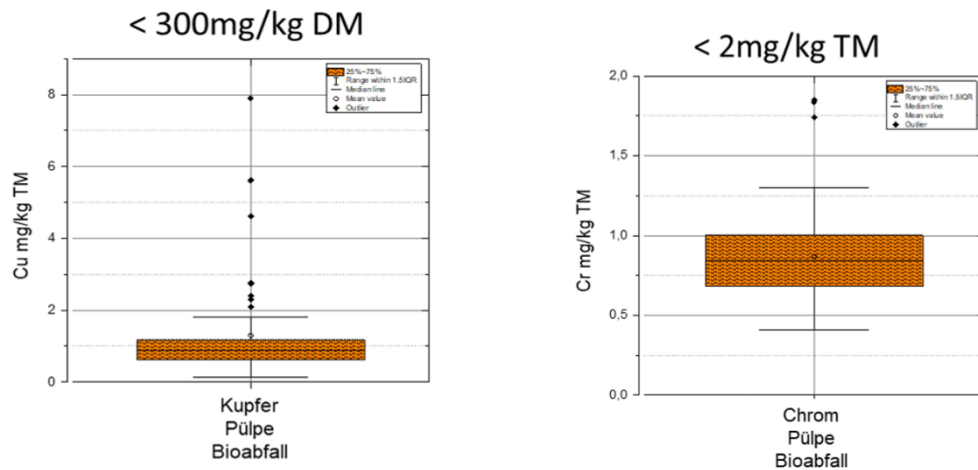


Abbildung 21: Untersuchung von toxischen Stoffen in mg/kg Trockenmasse in der abgetrennten Pülpe: Kupfer und Chrom

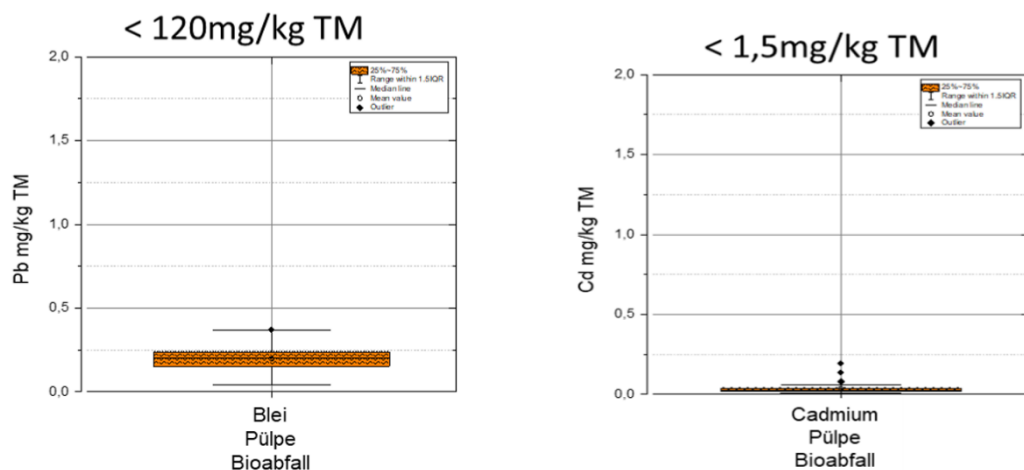


Abbildung 22: Untersuchung von toxischen Stoffen in mg/kg Trockenmasse in der abgetrennten Pülpe: Blei und Cadmium

6) Ergebnisse aus der Masse- und Energiebilanzierung

In Abbildung 23 ist die Bilanz der Frischmasse und in Abbildung 24 der organischen Trockenmasse, (TM- und oTM-Bilanz) für den Durchlauf der Thermodruckhydrolyse dargestellt. Es ist der Durchschnittswert aller Durchläufe zusammengefasst, da die einzelnen Durchläufe sich nur wenig voneinander unterscheiden. Bei der Betrachtung der Frischmassebilanz wird deutlich, dass zur Behandlung des im Hydrozyklon vorgereinigten und anschließend separierten Bioabfalls etwa 30 % der frischen Inputmasse an Wasser zugesetzt werden muss, um eine für die TDH passende Konsistenz zu erhalten. Beim Entspannen des Substrates nach dem TDH-Prozess tritt durch ausströmenden Dampf und Partikel ein Frischmasseverlust von etwa 5 % auf. Für den anschließenden Entstippungsprozess muss 374 kg Wasser zugesetzt werden, um eine pumpfähige und in der Entstippung behandelbare Mischung zu erhalten. Nach der gesamten Behandlung und erneuter Separierung des entstippten Gemisches bleiben etwa 50 kg Faser für die stoffliche Nutzung und 467 kg Pülpe für die Festbettbiogasanlage zur Verfügung. Die Frischmassebilanz zeigt deutlich, dass eine Rezirkulation der Wassermengen in Zukunft angestrebt werden sollte. Um vergleichbare Prozessbedingungen sicherzustellen, wurde dies im Projekt nicht untersucht. Durch die Rezirkulation könnte aber sowohl die benötigte Wassermenge als auch die Menge an Pülpe deutlich reduziert werden.

Die Betrachtung der Bilanz der organischen Trockensubstanz zeigt ein anderes Bild. Aus 32 kg_{oTM} im Input werden 18 kg_{oTM} (56%) in die Faserfraktion gelenkt, 14 kg der oTM (44 %) sind in der Pülpe wieder zu finden. Die Pülpe besitzt eine TM von 3,4 %. Das Rezirkulieren der Pülpe im Prozess der TDH könnte dies massiv steigern. Da mit höherer TM die Größe der Biogasreaktoren verringert werden kann und weniger Masse aufgeheizt werden muss, ist eine Erhöhung der TM anzustreben.

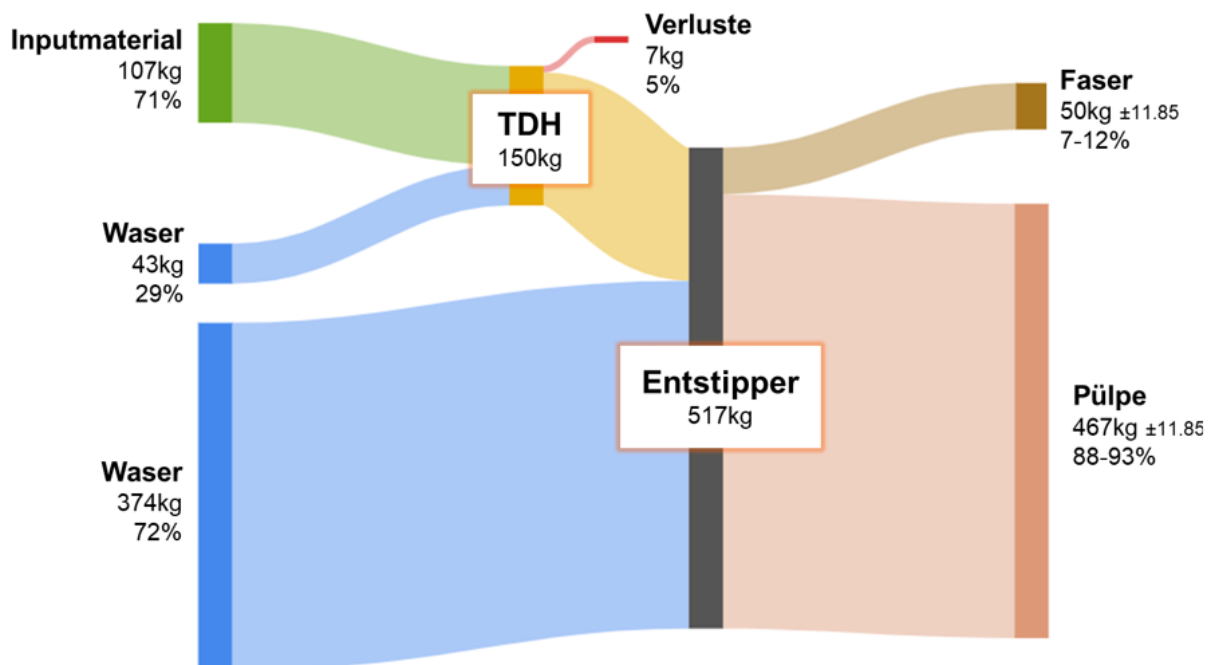


Abbildung 23: Frischmassebilanzierung der Pilotanlage Thermodruckhydrolyse bezogen auf Inputmasse

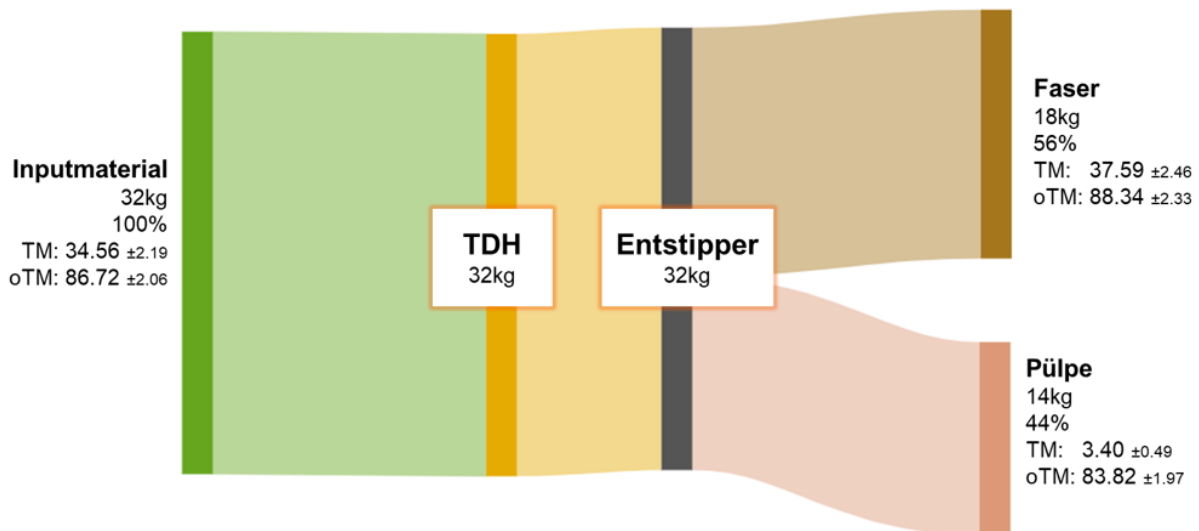


Abbildung 24: Bilanz der organischen Trockenmasse bezogen auf Inputmasse

In Abbildung 25 ist die durchschnittliche Energiebilanzierung pro Versuchsdurchgang als Durchschnitt über alle durchgeführten Versuche an der TDH-Anlage in Backnang dargestellt. Dabei wurde der Energieinhalt des Inputmaterials über dessen spezifischen Methanertrag berechnet ($265 \pm 16 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ kg}_{\text{oTM}}^{-1}$). Darüber hinaus geht der Energieverbrauch für die Aufheizung, Behandlung und Entstippung auf der Inputseite in die Betrachtung ein. Auf der Inputseite steht ein gesamter Energieinput von 1267 kWh. Die Aufbereitung durch die TDH und die Entstippung schließen das Inputmaterial intensiv auf, so dass der spezifische Methanertrag der abgetrennten Pülpe bei $336 \pm 17 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ kg}_{\text{oTM}}^{-1}$ liegt. Dies ist gegenüber dem Inputmaterial der TDH mit einem spezifischen Methanertrag von $265 \pm 16 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ kg}_{\text{oTM}}^{-1}$ eine erhebliche Steigerung. Gleichzeitig liegt der spezifische Methanertrag der abgetrennten Faser nur noch bei $217 \pm 16 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ kg}_{\text{oTM}}^{-1}$, da Fasern nur schwer vergärbar sind. Der Energieinhalt von Faser und Pülpe liegt in Summe bei 882 kWh t^{-1} . Insgesamt tritt im gesamten Behandlungsprozess jedoch ein erheblicher Energieverlust in Höhe von 385 kWh t^{-1} Input auf.

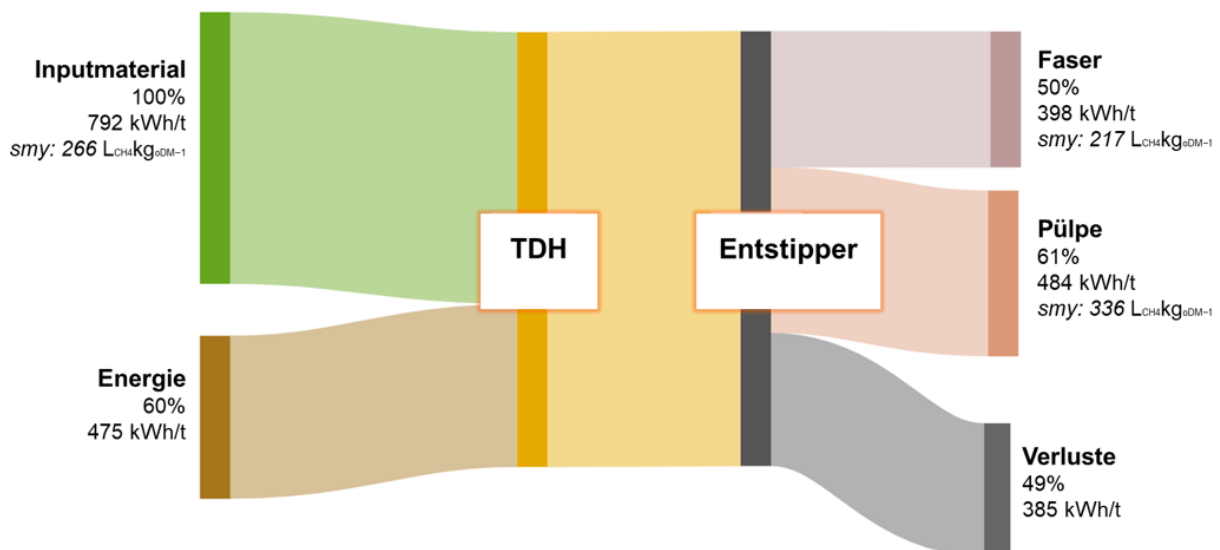


Abbildung 25: Energiebilanzierung der Thermodynamischen Hydrolyse bezogen auf den Energiegehalt des Inputmaterials (Bioabfall)

Die gesamte Anlage ist aufgrund ihrer im Vergleich zu einem Praxismaßstab noch geringen Größe nicht energetisch optimiert. Es ist keine Rückführung von aufgeheizter Flüssigkeit in den Prozess eingebaut und die Anlage ist nicht mit Wärmetauschern ausgestattet. Durch eine Optimierung dieser Wärmeflüsse und der Rückgewinnung könnte ein beachtlicher Teil der verlorenen Energie zurückgewonnen werden. Dies wäre eine wichtige Fragestellung für ein Folgeprojekt.

Zusammenfassung aus den Untersuchungen an der TDH

- Die intensive Behandlung des Bioabfalls (= hohe Temperatur/Haltezeit) erhöht den Trockenmassegehalt in der Pülpe und in der Faser und senkt den pH-Wert in der Pülpe
- Die Anteile an XF, NDF und ADF steigen mit steigendem Schweregrad-Faktor in der Faser an
- Der Säuregehalt beim Inputmaterial schwankt stark aufgrund der Fluktuationen im Bioabfall
- Es konnte festgestellt werden, dass die flüchtigen Fettsäuren insgesamt effektiv abgetrennt und in die Pülpe überführt werden. Damit stehen sie für die energetische Nutzung im Biogasprozess zur Verfügung
- Der spez. Methanertrag im Inputmaterial liegt bei $265 \pm 16,01 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ kg}_{\text{OTM}}^{-1}$. Durch die TDH verbleibt in der Faserfraktion ein niedriger Methanertrag von etwa $217 \pm 16,35 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ kg}_{\text{OTM}}^{-1}$. Der spezifische Methanertrag der Pülpe wird aufgrund des Substrataufschlusses und der Abtrennung der Zellinhaltsstoffe auf $336 \pm 17,15 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ kg}_{\text{OTM}}^{-1}$ erhöht.
- 56% der organischen Substanz des Ausgangsmaterials verlagert sich in die Faser, 44% in die Pülpe
- Die TDH-Pilotanlage benötigt 475 kWh t^{-1} Strom- und Heizenergie, die durch die Gewinnung und energetische Verwertung von der Pülpe (484 kWh t^{-1}) zurückgewonnen werden kann. In diesem Bereich sind Optimierungsmöglichkeiten, wie z.B. die Rückführung der Pülpe in den Prozess, erkennbar, die die Energiebilanz des Systems verbessern sollten. Aufgrund der Verzögerung im Projekt konnte dies allerdings nicht geprüft werden.
- Durch die Temperatur während der Behandlung könnte es zu einer Bildung von Phenolen, HMF und Furfuralen kommen. Die Untersuchungen belegten eine sehr niedrige Konzentration dieser Stoffe, die für den Biogasprozess und die Umwelt keine Risiken bergen.
- Die Pülpe aus dem Bioabfall wurde auf die Konzentrationen an Schwermetallen (Zn, Ni, Cu, Cr, Pd, Cd) untersucht. Der Gehalt der relevanten Schwermetalle lag weit unter den zulässigen Grenzwerten für eine Ausbringung als Dünger auf landwirtschaftlicher Nutzfläche.

3.3 Hochleistungsfermentation (AP 3)

Autoren: Dr. Oechsner, H.; Dr. Hülsemann, B.; Baumgart, M. (LAB)

Im Projekt konnte nachgewiesen werden, dass die zweistufige Biogasanlage mit dem separierten Dünns substrat (Pülpe) aus der TDH betrieben werden kann. Es konnte eine hohe Methanausbeute realisiert werden, die mit dem Methanpotential aus dem Methanertragstest (HBT nach VDI-Richtlinie 4630) erreicht wird ($342 \text{ L kg}^{-1}_{\text{OTS}}$). Der Festbettreaktor konnte bis zu einer Raumbelastung von $11 \text{ kg}_{\text{OTS}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ sehr stabil betrieben werden. Eine Rückführung des Gärrests in die Hydrolysestufe war in der gesamten Projektlaufzeit nur einmal notwendig.

Die organische Raumbelastung wurde zwischen 4 und $11 \text{ kg}_{\text{OTS}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ variiert. In jedem Fall konnten im täglichen Durchschnitt Methanpotentiale um $342 \text{ L kg}^{-1}_{\text{OTS}} \pm 50$ realisiert werden (siehe Abbildung 26). Gleichzeitig variiert die Verweilzeit zwischen 2,5 und 8 Tagen (siehe Abbildung 27). Dies ist deutlich unter den herkömmlich notwendigen Verweilzeiten von ca. 30 - 40 Tagen in voll durchmischten, einstufigen CSTR-Fermentern. Dementsprechend konnte das Projektziel erfolgreich erreicht werden.

Im Versuchsablauf konnte auch bewiesen werden, dass die zweistufige Festbettfermenteranlage extrem flexibel auf veränderte Fütterungsmenge reagiert. Bei einer Steigerung der Fütterung konnte innerhalb weniger Stunden eine Steigerung der Methanausbeute gemessen werden. Auch ein Betrieb ohne Fütterung von mehreren Tagen hat der Fermenter problemlos verkraftet und sofort nach neuem Fütterungsbeginn mit der Gasproduktion begonnen. Dies ist für eine flexible (tägliche und saisonale) Strom- und Wärmeproduktion entsprechend des Bedarfs hochinteressant und kann einen erheblichen ökonomischen Vorteil bieten.

Besonders problematisch sind allerdings Sand- und Schlamm-Ansammlungen in der Hydrolysestufe. Diese sind nach spätestens 2-4 Wochen Betrieb aufgetreten. Dies führte zu einem unerwünschten Ausfall der ursprünglich eingesetzten Impellerpumpen. Erst mit dem Einbau deutlich robusterer Exenterschneckenpumpen konnte das Problem des hohen Verschleißes verbessert werden. Trotzdem war eine regelmäßige Entnahme des abrasiven Sandes aus der Hydrolysestufe erforderlich. Im Betrieb wurde zudem per Bypass regelmäßig Sand/Schlick aus der Anlage gepumpt. Der Anfall dieser Feinpartikel

hängt mit dem Ausgangssubstrat Bioabfall zusammen und konnte trotz des zwischengeschalteten Hydrozyklons vor der TDH-Stufe nicht weit genug reduziert werden. Eine Verbesserung der Abtrennung dieser Störstoffe ist in weiteren Untersuchungen notwendig.

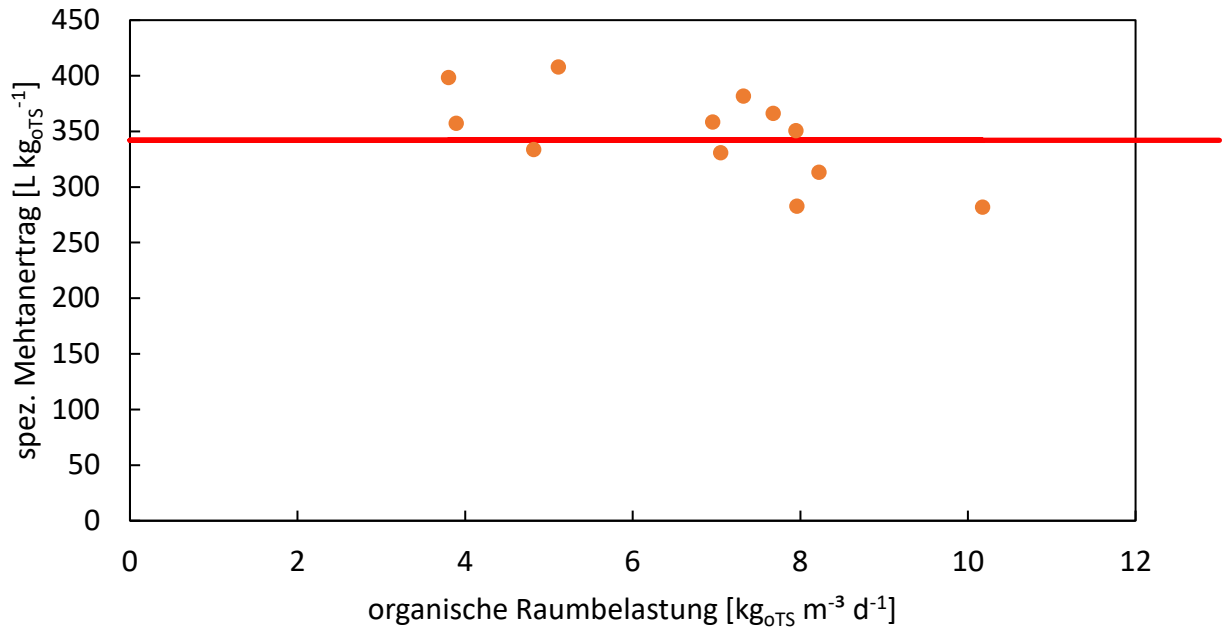


Abbildung 26: Spezifischer Methanertrag über die organische Raumbelastung aufgetragen; Rote Linie: durchschnittliches Methanpotential Pülpe laut HBT nach VDI-Richtlinie 4630; jeder Punkt entspricht Mittelwert eines Messtages

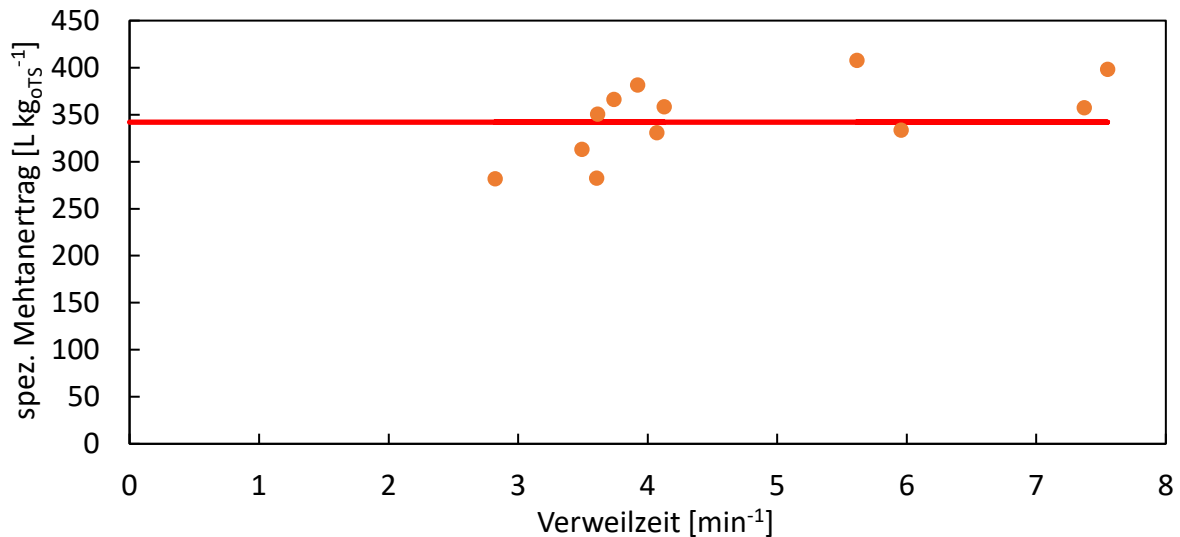


Abbildung 27: Spezifischer Methanertrag über die Verweilzeit aufgetragen; Rote Linie: durchschnittliches Methanpotential Pülpe laut HBT nach VDI-Richtlinie 4630; jeder Punkt entspricht Mittelwert eines Messtages

Zusammenfassung aus den Untersuchungen an der Biogasanlage

In der Biogasanlage kann die Flüssigkeit innerhalb von 2-4 Tagen vollständig vergoren werden. Die Reaktoren zeigen zudem eine hohe Stabilität und Flexibilität. Eine hochflexible Vergärung scheint möglich. Einzig der Eintrag von Fremdstoffen, insbesondere Sand, ist zu verhindern, bzw. über technische Maßnahmen zu lösen. Weitere Langzeitversuche nach erfolgter Optimierung in einem Folgeprojekt wären wünschenswert.

3.4 Faseraufbereitung und -nutzung (AP 4)

Autor: Dr. Helle, T. (Novis)

Folgende Produkte wurden hergestellt:

1) Pflanzfasertöpfe

Pflanzfasertöpfe (Abbildung 28) wurden als erste Testmuster händisch gefertigt. Nach Festlegung der Produktionsparameter wurden zwei Pressformen entwickelt, gezeichnet und hergestellt: Einmal in Hartkunststoff und ein weiteres Mal Aluminium (Abbildung 8). Die Versuche waren nicht aussagekräftig, da eine dafür geeignete größere Maschinerie nicht zur Verfügung stand.

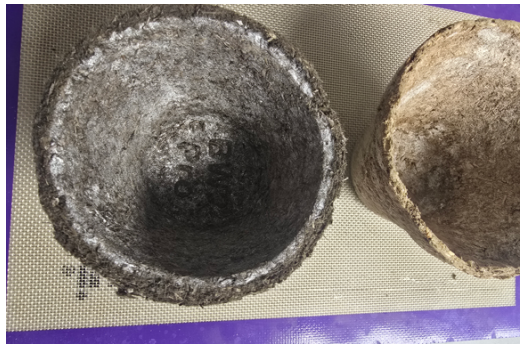


Abbildung 28: Faserpflanztopfmuster

2) Musterstücke

Es wurden Musterstücke aus gebleichten, vermahlenen Fasern hergestellt. Bei der Abschlussveranstaltung am 24.10.2024 in Hohenheim konnten Musterstücke an den Staatssekretär Dr. Baumann (UM) und den Projektkoordinator Dr. Oechsner (LAB) übergeben werden (vgl. Abbildung 29). Weitere Musterplatten wurden mit Bioharz hergestellt, könnten preislich jedoch nicht mit ähnlich leistungsfähigen Platten konkurrieren.



Abbildung 29: Musterstück (links), Musterübergabe bei der Abschlussveranstaltung in Hohenheim (rechts)

3) Steine

Es wurden Musterstücke als Lehmsteine mit Faserbeimischung gefertigt. Sie eignen sich gut für den ökologischen Hausbau (Abbildung 30, links). Es wurden Presslinge hergestellt, die als Heizbrikett geeignet sind (Abbildung 30, Mitte). Pellets und Briketts zu Heizzwecken sind nach unserer ökonomischen Bewertung kommerziell sinnvoll zu fertigen.

4) Vliese und Pappen

Aus dem Material wurden auf einer Papieranlage Vliese gefertigt, die eine gute und stabile Konsistenz haben (Abbildung 30, rechts). Weiter wurden Pappen in verschiedenen Mahlgraden hergestellt. Vliese und Pappen haben Marktpotenzial.

5) Weitere Produkte

Es wurden Mulchplatten als Baumringe gefertigt (marktgängig) sowie Samenpellets zur Aussaat in urbanen Regionen (Spielerei).

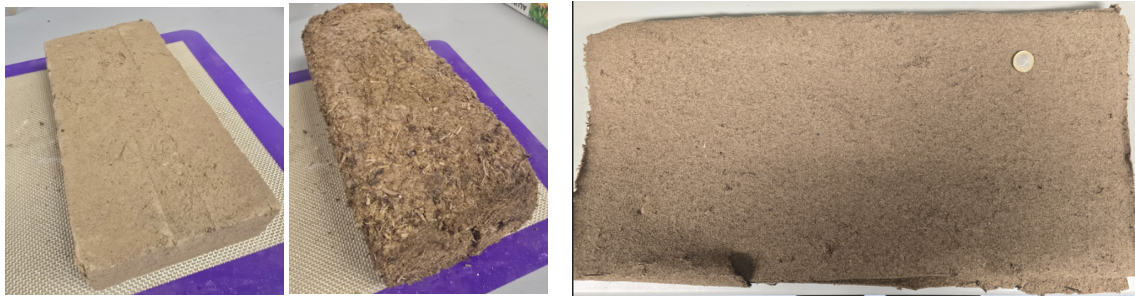


Abbildung 30: Lehm-dämmstein (links), Faserbrikett (Mitte), Vliesmatte (rechts)

3.5 Cellulaseproduktion (AP 5)

Autoren: Dr. Wilke, A.; Zielińska, O. (HSO)

1) Optimierung der Cellulaseproduktion unter Verwendung des Labormediums und unterschiedlicher Produktionsstämme

Um die Cellulaseproduktivität zu maximieren, wurde eine Reihe von Optimierungen sowohl am Fermentationsprozess als auch am synthetischen Labormedium durchgeführt (vgl. Abbildung 32). Durch Optimierungen der Feedingstrategie (Automatisierung des Feeds auf Grundlage des Respirationsquotienten RQ, Verkürzung der Batchanwachstumsphase und Stammwechsel) konnte die Raum-Zeit-Ausbeute von $1 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ auf $30 \text{ g L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ Cellulaseprotein gesteigert werden. Im nächsten Schritt wurden mittels strukturierter Prozessmodellierung die Parameter identifiziert, die die Enzymproduktion maximal beeinflussen (Glucosekonzentration zu Versuchsbeginn und spezifische Feedrate). Beide Parameter wurden durch die Design of Experiment (DoE) -Methodik optimiert. Die Raum-Zeit-Ausbeute konnte mit dieser Maßnahme bis auf einen maximalen Wert von $42 \text{ mg Protein pro Liter und Stunde}$ erhöht werden (vgl. Abbildung 32). Der Produktionsstamm *Trichoderma reesei* RL-P37 zeigt ein deutlich schnelleres Wachstum (in einigen Fermentationen bis 70 % kürzere Batchanwachstumsphase im Vergleich zum Stamm PC-3-7). Als nachteilig erweist sich bei diesem Stamm jedoch die verringerte Robustheit während des Produktionsprozesses. Geringfügige Änderungen von Betriebsparametern (z.B. Aussetzen der pH-Regulation über Nacht, zu hoher Antischaumfeed) führen zu irreversiblen Schädigungen. Die Cellulaseproduktion kommt folglich zum Erliegen.

Die dargestellten Ergebnisse sind in den jeweiligen Abschlussarbeiten detailliert beschrieben (Vgl. Chróst 2023, Łukasiewicz 2024, Maurer 2022, Maurer 2024, Rischbeck 2023, Welzel 2024, Zielińska 2023).

2) Verwendung der Bioabfallpülpe als Substrat

- Charakterisierung des Bioabfalls

In einem ersten Schritt wurden die verwendete Pülpe (flüssige Phase des Bioabfalls nach der Thermo-druckhydrolyse) und das synthetische Labormedium hinsichtlich seiner Inhaltsstoffe analysiert, um Optimierungspotenziale für die Produktion von Cellulasen und Biogas zu ermitteln. Vom synthetischen Labormedium und der Pülpe des realen Bioabfalls wurde die Trockenmasse, der organische TS-Gehalt sowie die Makro- und Mikronährstoffe analysiert (vgl. Abbildung 31). Es wurde festgestellt, dass Phosphat-, Kalium-, Schwefel-, Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt in der Pülpe in geringeren Konzentrationen als im synthetischen Medium vorliegen (linke Seite in Abbildung 31). Andere Elemente wie Zn, Mn, Al, Ca, Cr, Fe, Pb, Mg und Na waren in der Pülpe in höherer Konzentration als im Labormedium vorhanden (rechte Seite in Abbildung 31).

- Verwendung der Pülpe im Cellulase-Produktionsprozess

Vor der Fermentation wurde der flüssige Pülpeanteil im Schüttelkolbenmaßstab auf Hemmstoffe und dessen Eignung für mikrobielles Wachstum getestet. Hierbei wurde schrittweise der Pülpeanteil erhöht (0 %, 40 %, 60 %, 80 % und 100 % Pülpeanteil; aufgefüllt auf 100 % mit Labormedium) und das Biomassewachstum gemessen. Mittels Biomassewachstum und Verbrauch des Kohlenstoffs kann eine Biomasseausbeute $Y_{x/s}$ berechnet und eine Aussage zur Verwertung der Pülpe gemacht werden. Der

höchste Biomasseausbeutekoeffizient (0,6 g Biomasse/g Substrat) wurde bei 60 % Pülpe beobachtet (Welzel 2024) und folglich in der ersten Fermentation eingesetzt (Łukasiewicz 2024). Die Ergebnisse der Fermentation führten zu einer Raum-Zeit-Ausbeute von 15 mg L⁻¹ h⁻¹. Der gleiche Versuch mit reinem Labormedium ergab eine Raum-Zeit-Ausbeute von 30 mg L⁻¹ h⁻¹.

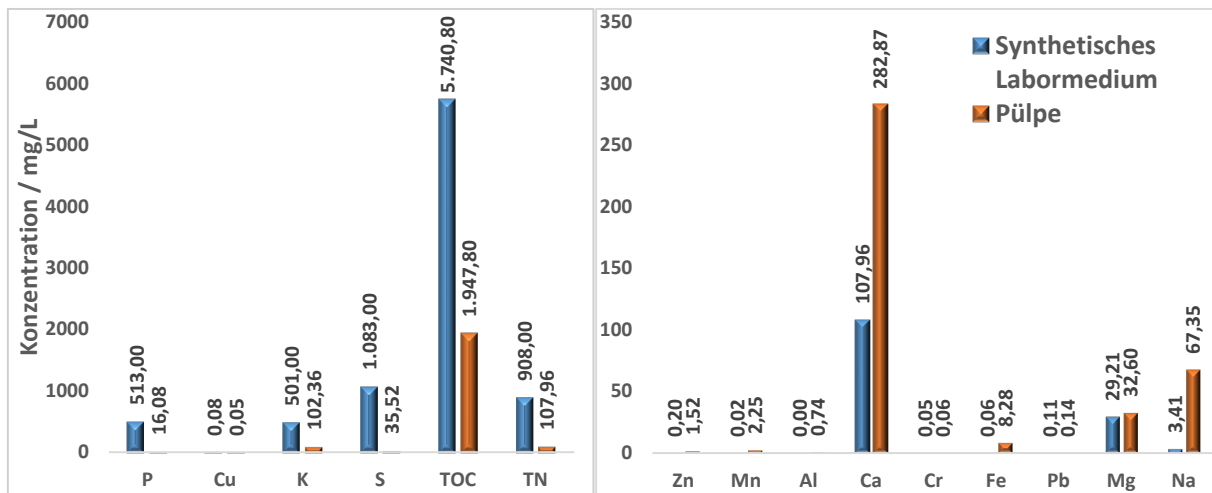


Abbildung 31: Analyse wichtiger Inhaltsstoffe des synthetischen Labormediums und der Pülpe aus Bioabfall

Da der Biomasseausbeutekoeffizient nicht zwangsläufig mit der Raum-Zeit-Ausbeute der Cellulaseproduktion korrelieren muss, wurde anschließend eine Fermentation mit 100% Pülpe durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass die Raum-Zeit-Ausbeute im Vergleich zu 60% Pülpe auf 20 mg Protein pro Liter und Stunde gesteigert werden konnte, aber noch unter dem Vergleichsversuch mit synthetischem Medium (30 mg L⁻¹ h⁻¹) liegt. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass der Einsatz von Pülpe die Enzymproduktion ermöglicht, aber die Raum-Zeit-Ausbeute negativ beeinflusst wird. Gründe für die verminderte Enzymproduktion liegen vermutlich in inhibierenden Inhaltsstoffen. Diese konnten aber in der Projektlaufzeit nicht mehr ermittelt werden.

Zurzeit werden noch weitere Fermentationen mit 100% Pülpe und optimierten Einflussparametern durchgeführt, um das maximale Enzymbildungspotential unter Verwendung der Pülpe zu ermitteln.

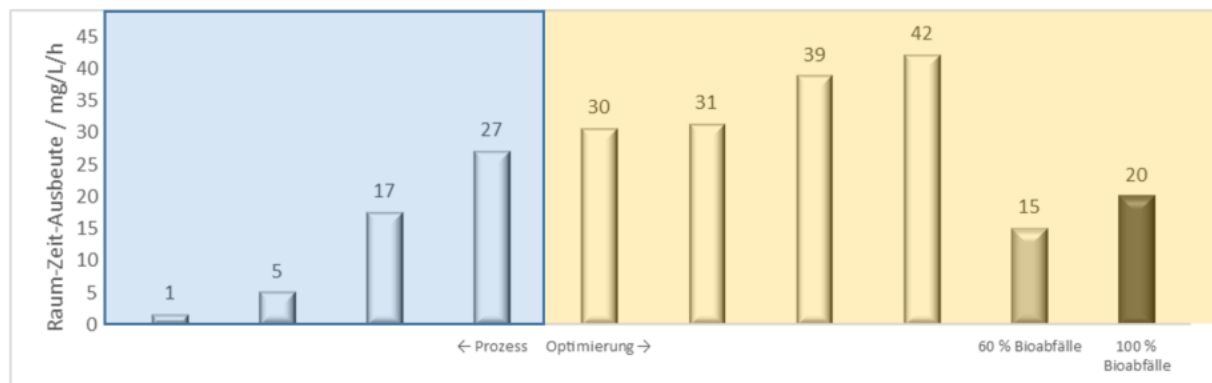


Abbildung 32: Produktivitätsentwicklung bei der Kultivierung von *Trichoderma reesei*: Prozessoptimierung und Auswirkungen des Bioabfallmediums mit den Stämmen *T.reesei* PC-3-7 (blauer Hintergrund) und *T.reesei* RL-P37 (gelber Hintergrund). Die ersten 8 dargestellten Raum-Zeit-Ausbeuten basieren auf reinem Labormedium.

- Verwendung der Fasern des Bioabfalls als Zuckerquelle für die Fermentation

Im nächsten Schritt wurde das Potenzial der Restfasern im festen Teil des Bioabfalls nach der Thermo-Druckhydrolyse untersucht. Ziel war es, durch den Einsatz der Cellulasen den enthaltenen Celluloseanteil der Fasern in monomere Zuckerbausteine umzusetzen.

Neben Fasern wurde auch Weizenstroh als Positivkontrolle in die Untersuchungen einbezogen (vgl. Abbildung 33). Die Ergebnisse zeigen, dass die im Bioabfall vorhandenen Fasern mit den verwendeten Cellulasen nicht zu hydrolysieren sind. Dass die Cellulasen wirksam sind, zeigt die nahezu vollständige Verzuckerung des thermodruckhydrolysierten Weizenstrohes als Positivkontrolle (Verzuckerungsgrad

bei ca. 80%). Die eingesetzten Fasern des Bioabfalls konnten trotz alkalischer oder mechanischer Vorbehandlung dagegen nur wenig hydrolysiert werden. Gründe hierfür könnten im geringen Cellulosegehalt der Fasern oder in der schlechten Zugänglichkeit für die Enzyme zur Cellulose liegen. Die Zusammensetzung der Bioabfallfasern hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung wird zurzeit noch untersucht.

3) Integration in die Biogasproduktion: Untersuchung der Auswirkungen von Cellulasen auf die Biogasproduktion

- Optimierung der Einsatzkonzentration der Cellulasen zur effektiven Biogasproduktion

Zur Optimierung der Hydrolyseeffizienz musste zunächst die optimale Enzymkonzentration pro Gramm Substrat-Trockensubstanz bestimmt werden, bevor sie im Biogasexperiment eingesetzt werden konnte. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass eine Einsatzkonzentration der Cellulasen von 20 mg pro g organischer Trockenmasse zielführend ist (Chróst 2023).

Die behandelten Abfallströme wurden vor den Biogasbatchversuchen nach VDI 4630 für 24 h enzymatisch vorbehandelt, um den Enzymen ausreichend Zeit zu geben, die enthaltene Cellulose zu hydrolysieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die enzymatische Vorbehandlung die Kinetik und die Biogasausbeute erheblich verbessert (Abbildung 33). Nach 5 Tagen wurden mit Cellulasen ca. 75% des finalen Biogasvolumens erreicht, während ohne Einsatz von Cellulasen erst ca. 55% erzielt werden. Auch die Biogasmenge am Ende des Versuchs wird durch den Einsatz von Cellulasen beeinflusst: Der enzymatisch vorbehandelte Bioabfall erreicht final ein spezifisches Biogasvolumen von $639 \text{ NL kg}_{\text{oTS}}^{-1}$, während der nicht vorbehandelte Bioabfall ein Methanvolumen von $578 \text{ NL kg}_{\text{oTS}}^{-1}$ erreicht (11%ige Steigerung). Vergleichbare Werte werden auch bei der Methanbildung erzielt. Die detaillierten Ergebnisse sind bei Chróst (2023) nachzulesen. Die dargestellten Ergebnisse basierten auf einem synthetischen Bioabfall, da der reale Bioabfall erst im letzten Projektjahr zur Verfügung stand.

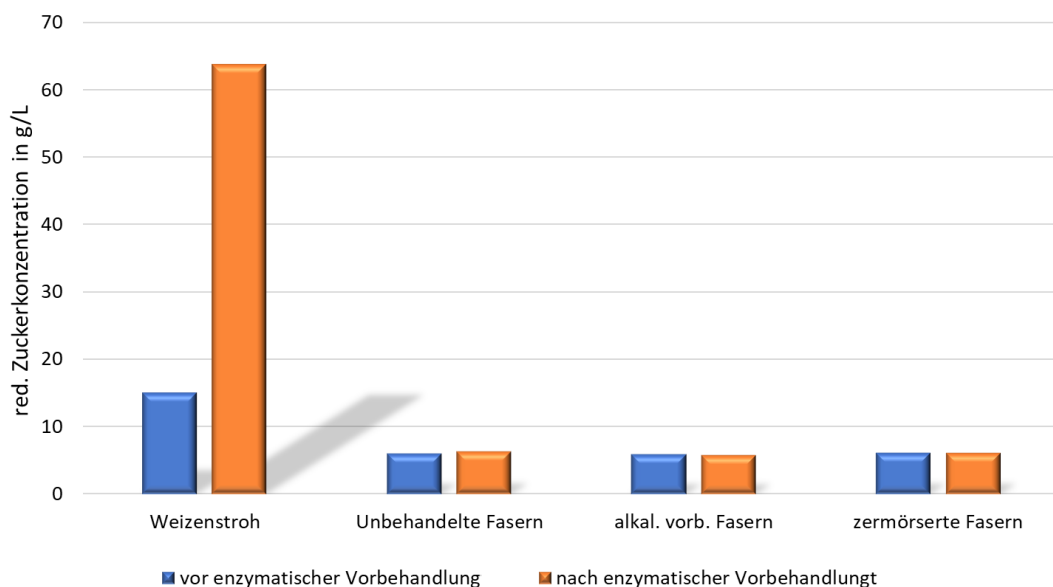


Abbildung 33: Enzymatische Hydrolyse von Weizenstroh (thermodruckhydrolysiert) als Positivkontrolle und vorbehandelte Fasern des Bioabfalls (ebenfalls nach Thermodruckhydrolyse).

Im letzten Projektjahr wurden die erzielten Erkenntnisse mit synthetischem Bioabfall mit dem realen Bioabfall wiederholt. Der reale Bioabfall zeigte ein nahezu identisches Verhalten wie der künstliche (Labor)Bioabfall. Biogasbildungskinetik und Biogasertrag wurden durch den Einsatz der Enzyme ebenfalls gesteigert. Am Ende des Versuchs lag die kumulative Biogasproduktion bei $635 \text{ NL kg}_{\text{oTS}}^{-1}$ für die enzymatisch vorbehandelte Pülpe, während die unbehandelte Pülpe $516 \text{ NL kg}_{\text{oTS}}^{-1}$ liefert, was einer Steigerung der gesamten Biogasausbeute um etwa 23 % entspricht. In Bezug auf die Methanproduktion konnte eine Steigerung um 12 % beim Einsatz der realen Pülpe erreicht werden. Beide Ergebnisse zeigen, dass die enzymatische Vorbehandlung von künstlichen Bioabfällen und Zellstoffsubstraten zu deutlich höheren Biogaserträgen im Vergleich zu unbehandelten Substraten führt.

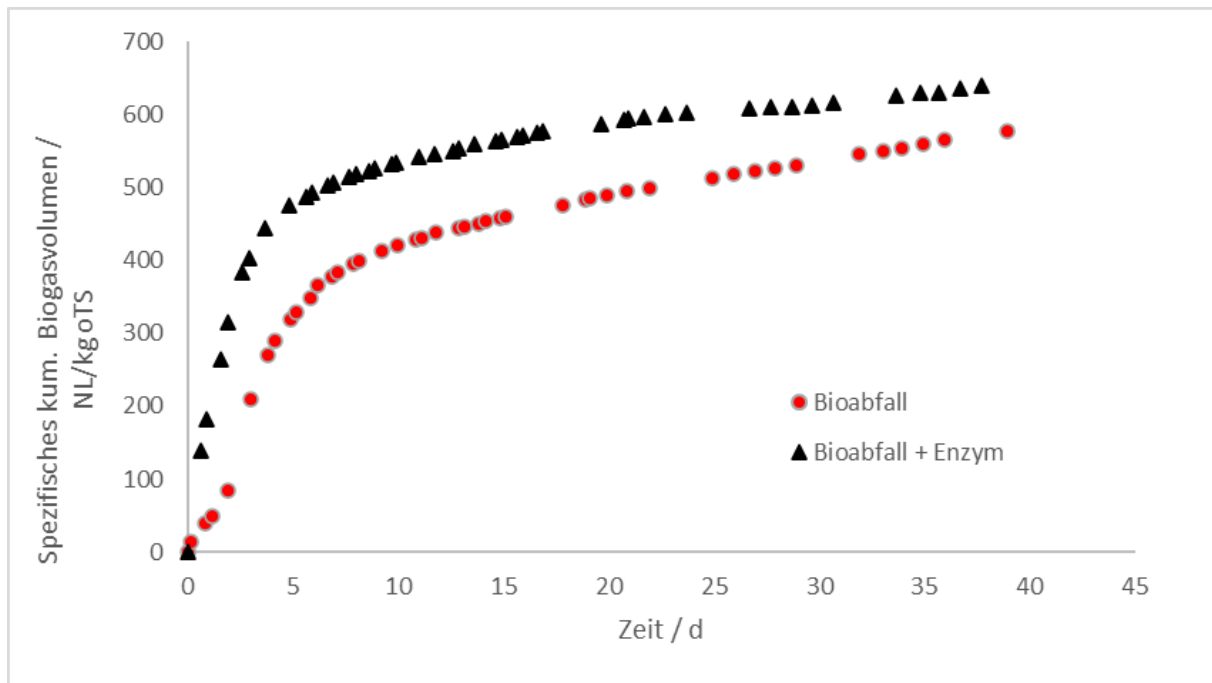


Abbildung 34: Spezifische kumulative Biogasproduktion von künstlichem Bioabfall mit und ohne Vorbehandlung durch Cellulasen im Biogasbatchversuch nach VDI 4630.

4) Integration in den Gesamtprozess: Bereitstellung von Enzymen für andere Arbeitspakete und Bewertung der Auswirkungen auf die gesamte Prozesskette.

Die produzierten Enzyme sollten in der späten Projektphase den APs 3 und 7 zur Verfügung gestellt werden.

- Bereitstellung der Cellulasen im AP 3

Im AP 3 sollten die Cellulasen vor der Biogasanlage eingesetzt werden, um mögliche Cellulosebestandteile im Zulauf zu hydrolysieren. Es sollte untersucht werden, inwieweit eine Steigerung der Biogasbildungskinetik und des Biogasertrags in der Pilotanlage festzustellen ist. Durch die bereits beschriebene Coronaproblematik und die damit verbundenen Verzögerungen wurden diese Experimente erst zu Projektende begonnen. Eine finale Auswertung der Daten ist bis zur Fertigstellung des Abschlussberichts nicht möglich gewesen.

- Bereitstellung der Cellulasen im AP 7

Da eine Verzuckerung der Fasern des Bioabfalls nicht erfolgreich war (vgl. Kapitel 3.5 Abschnitt 2), ist eine Versorgung der PHA Produktion (AP 7) mit Zuckermonomeren aus dem hydrolysiertem Bioabfall ebenfalls nicht möglich.

- Datenexport zur Ökologischen Bewertung AP 8

Für die ökologische Bewertung des Projekts (AP 8) wurden Biogasbatchuntersuchungen nach VDI 4630 mit Fermentationsresten durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass diese Fermentationsrückstände ein erhebliches Biogaspotential aufweisen und 665 NL Biogas pro Kilogramm organischer Trockenmasse (oTS) ergeben (Methananteil von 69 %). Dies ist vergleichbar mit der Biogasausbeute des Bioabfalls und zeigt deutlich, dass diese Rückstände ebenfalls eine effiziente Quelle für die Biogasproduktion darstellen können.

3.6 Nährstoffrückgewinnung (AP 6)

Autoren: Chaumette, C., Bohn, M. B. (IGB)

Wichtige Ergebnisse werden im Folgenden anhand selektierter Werte dargestellt und in Bezug auf den Anwendungsfall diskutiert.

Die Analyse der Gärreste zeigte der Literatur vergleichbare Ergebnisse. Abbildung 35 zeigt beispielhaft die Elementaranalyse eines Flüssiggärrests aus Backnang. Im Vergleich dazu zeigte der Gärrest der

Demonstrationsanlage geringe Nährstoffgehalte. Abbildung 36 zeigt die analoge Analyse des Gärrests aus der Demonstrationsanlage.

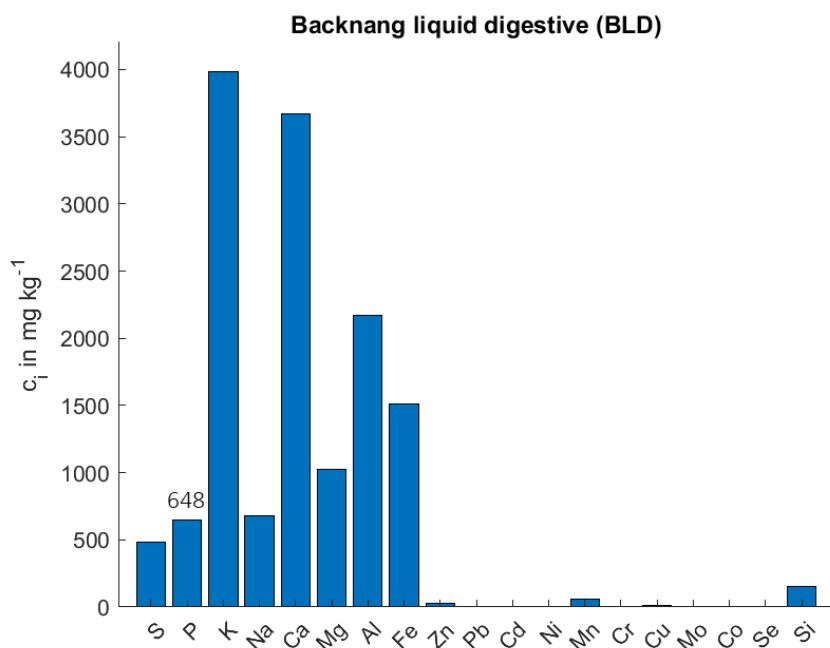


Abbildung 35: Elemente im Flüssiggärrest der laufenden Biovergärungsanlage (vom 2. Juli 2024, Bestimmung von Elementen mit induktiv gekoppeltem Plasma mittels Atomemissionsspektrometrie ICP-OES nach DIN EN ISO 11885)

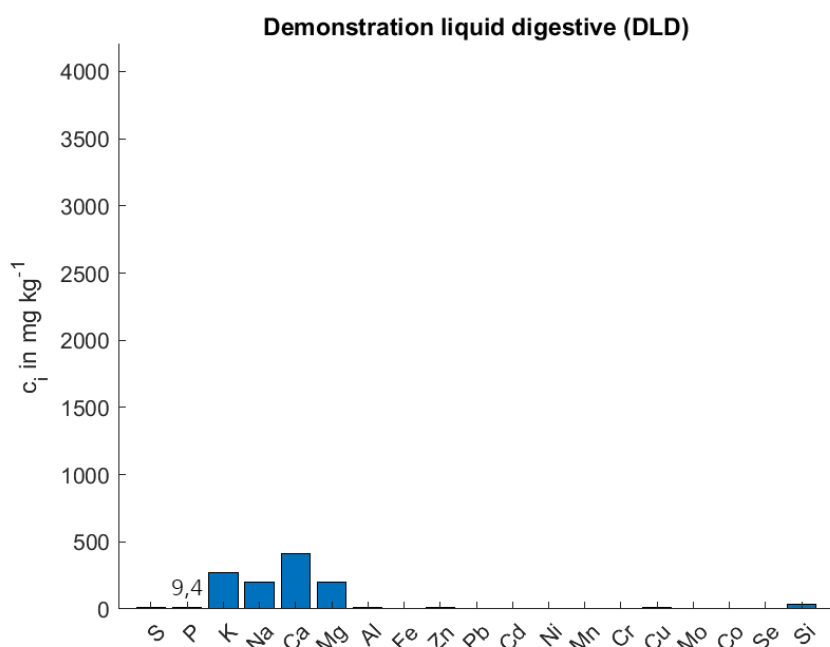


Abbildung 36: Elemente im Flüssiggärrest der Demonstrationsanlage (vom 2. Juli 2024, Bestimmung von Elementen mit induktiv gekoppeltem Plasma mittels Atomemissionsspektrometrie ICP-OES nach DIN EN ISO 11885)

Die im Folgenden beschriebenen Versuche wurden daher mit dem Flüssiggärrest der laufenden Biovergärungsanlage durchgeführt.

Abbildung 37 zeigt die in Lösung befindlichen Konzentrationen von Phosphat und Ammonium im Flüssiggärrest (gemessen im Überstand nach Zentrifugation) mit Säurezugabe (Schwefelsäure 5M, Hinweis:

Schäumen durch CO_2 Freisetzung beachten) auf pH 2 bis 7 und ohne Säurezugabe beim Original pH-Wert von ca. 8.

Abbildung 38 zeigt die entsprechenden Konzentrationen an gelöstem Magnesium und Calcium im Flüssiggärrest (ebenfalls gemessen im Überstand nach Zentrifugation) mit Säurezugabe (Schwefelsäure 5M) auf pH 2 bis 7 und ohne Säurezugabe beim Original pH-Wert von ca. 8.

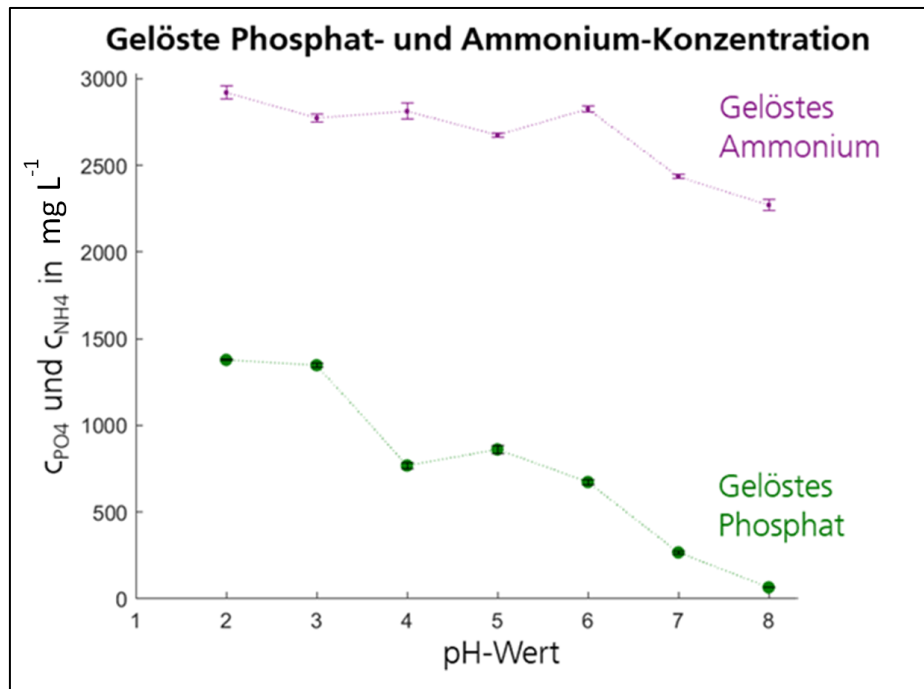


Abbildung 37: Phosphat und Ammonium im Flüssiggärrest. Messung mittels Hach-Lange Küvetten Schnelltests Orthophosphat (LCK350), Ammonium-Stickstoff (LCK303), $n=3$

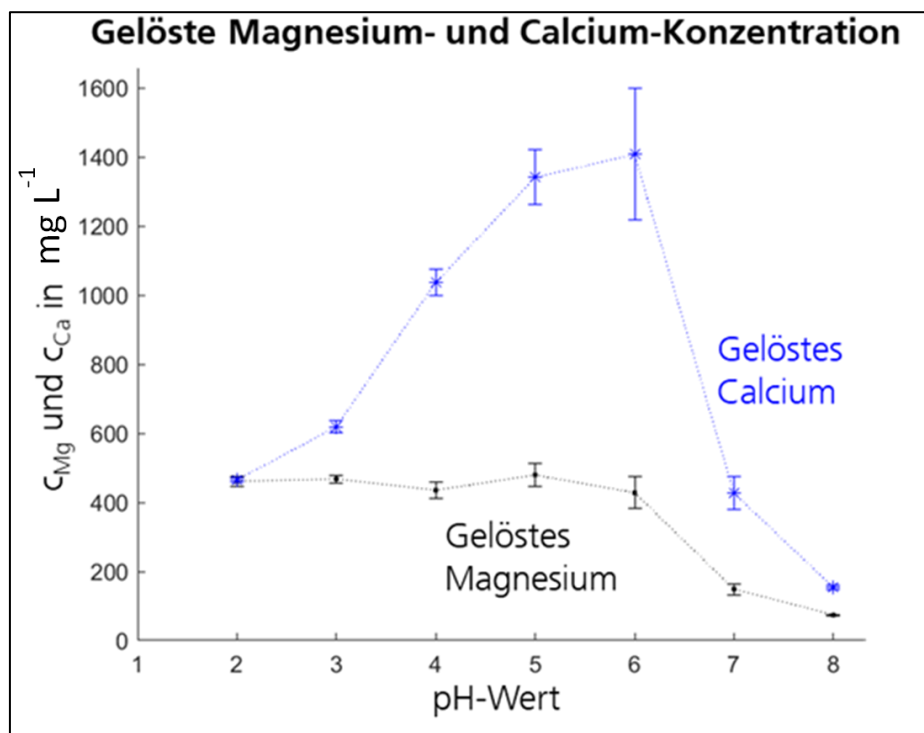


Abbildung 38: gelöstes Calcium und Magnesium im Flüssiggärrest. Messung mittels Hach-Lange Küvetten Schnelltest Magnesium und Calcium (LCK327), $n=3$

Erkenntnisse:

- Aufgrund der Ergebnisse liegt die Vermutung nahe, dass Phosphat im Flüssiggärrest bei Original pH auch als Calciumsalz vorliegt.
- Etwa die Hälfte des Phosphats ist an die Schwebstoffe des Flüssiggärrests gebunden.

Die Schwebstoffe im Flüssiggärrest erwiesen sich als äußerst schwer abscheidbar. Gängige Membranfiltrationen (0,45 Mikrometer und 0,2 Mikrometer) verblockten umgehend und Filterkerzen ebenfalls. Schwerefelder im Bereich von 4.000 g und wenigen Minuten, wie sie in größeren Apparaten für die Klärschlammbehandlung genutzt werden, genügten ebenfalls nicht zur Abscheidung.

Im Projekt wurde die Abscheidung im Labormaßstab bei 17 700g für 30 Minuten durchgeführt. Eine technische Lösung (z.B. eine Filtration über eine Schüttung mit regelmäßiger Abschälung der obersten Schicht) steht aus und hängt von der Nutzungsmöglichkeit möglicher Zwischenprodukte (z.B. einer Rückführung eines organischen Schüttguts mit den abgeschiedenen Schwebstoffen in den Biogasreaktor) ab.

P-Bilanz:

Aus dem flüssigen Überstand (nach Zentrifugation des angesäuerten flüssigen Gärrests) konnte eine Mischung von P-Salzen mit 226 g $\text{PO}_4\text{-P kg}_{\text{TM}}^{-1}$ und 9 g $\text{NH}_4\text{-N kg}_{\text{TM}}^{-1}$ gewonnen werden.

- In Bezug zum Flüssiggärrest (partikulärer + gelöster Phosphor) werden so 45 % des P als P-Salze zurückgewonnen.
- Bezogen auf gelöstes P (im Zentrifugenüberstand) wurden 94 % als P-Salze zurückgewonnen.

N-Bilanz:

Ammonium kann aus dem Flüssiggärrest direkt, oder nach der oben beschriebenen P-Salzfällung, nach pH-Wert Anhebung als Ammoniak ausgestrippt werden.

Die verfügbare und in zahlreichen Vorgängerprojekten selbst im Labor und Pilotmaßstab durchgeführte Gewinnung von Ammoniumsulfat wurde durch Luftstrippungsversuche am Flüssiggärrest bilanziert. Hierzu wurden die pH-Werte 10 und 12 mit Natronlauge eingestellt und der Gärrest mit original pH (ca. pH 8) mitgeführt. (Die Strippung erfolgte in 500 mL Batches mit geringem Luftstrom (1 NL min^{-1}) bei 35-40°C über 5h). Das Ammoniakgas kann dann in Schwefelsäure aufgefangen werden. Dies ergibt eine saure Düngерlösung bzw. nach Neutralisation und Trocknung Ammoniumsulfatsalz. (Trockenes Ammoniumsulfat enthält 21 g $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$.)

- In Bezug zum Flüssiggärrest wurden 61% des $\text{NH}_4\text{-N}$ ausgestrippt.
- Vom $\text{NH}_4\text{-N}$ im Zentrifugenüberstand wurden 84% ausgestrippt.

Die Energie und Chemikalienverbräuche wurden für die gesamte chemische Prozesskette bilanziert oder bestmöglich geschätzt und dem ifeu Institut zur Erstellung seiner Lebenszyklusanalyse übergeben. Gemeinsam wurden Annahmen zu Einsparungsmöglichkeiten bei der Skalierung in den Vollmaßstab getroffen. Gegenüber der konventionellen Herstellung von Phosphatdünger aus Phosphatgestein und von Stickstoffdünger aus Luftstickstoff mit fossiler Energie bietet das Verfahren für beide Produkte einen niedrigeren CO_2 -Fußabdruck. Die Analyse zeigte zudem Möglichkeiten zur weiteren Prozessverbesserung hinsichtlich der Umweltbilanz klar auf.

Die praktische Anwendbarkeit der Phosphat- und Ammoniakrückgewinnung als Spezialdüngemittel oder Düngemittelkomponente konnte im Labormaßstab an Gärrest der laufenden Biovergärungsanlage Backnang bestätigt werden. Der Gärrest der BW2Pro-Demonstrationsanlage auf dem Gelände der Biovergärungsanlage Backnang zeigte für die Nährstoffrückgewinnung zu niedrige Konzentrationen, kann aber voraussichtlich mit wenig Aufwand zur Einleitung in Oberflächengewässer (nach Abwasserverordnung) aufbereitet, oder kostenarm an eine Kläranlage abgegeben werden. Die gezeigten Technologien zur Phosphat- und Ammoniakrückgewinnung als Spezialdüngemittel oder Düngemittelkomponenten ist auf zahlreiche Biovergärungsanlagen in Deutschland und weltweit übertragbar.

Die im Projekt angewandten Nährstoffrückgewinnungsverfahren wurden bereits im Demonstrationsmaßstab und Vollmaßstab für andere Substratströme etabliert und sind somit marktfähig, bzw. bedürfen nurmehr einer mehrjährigen Demonstration im Demonstrationsmaßstab an mehreren Bioabfallvergärungsanlagen, um eine fundierte Kostenschätzung zu ermöglichen. Durch die für die nächsten Jahre erwartete weitere kostengünstige Verfügbarkeit und Marktkonkurrenz von Düngemitteln aus Phosphorsteinbrüchen und von mit fossiler Energie synthetisiertem Ammoniak ist die Investitionsfreude der Düngemittelindustrie und anderer Investoren für diese Demonstrationsvorhaben jedoch gering. Eine

Marktchance könnte sich kurzfristig aus der Einsparung von Abwassergebühren oder Flüssiggärrestabgabekosten der Bioabfallvergärungsanlagen ergeben, sowie mittelfristig über die im Projekt identifizierten CO₂-Einsparungen und ggf. regionale Vorgaben über verpflichtende Recyclingdüngerquoten. Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse werden weiter genutzt. Sowohl das Fraunhofer IGB als auch die Universität Hohenheim und die Universität Stuttgart bewerben sich um weitere Forschungsprojekte und stellen ihre Fachkenntnisse etablierten Firmen und Start-Ups gleichermaßen zur Verfügung.

3.7 Biokunststoffproduktion (AP 7)

3.7.1 Biologische PHA-Produktion (AP 7.1)

Autor: Achenbach, B. (IGVP)

Es konnten im Projektverlauf alle Meilensteine durch das IGVP bearbeitet werden (vgl. Abbildung 59 in Anhang 3). Anpassungen sind in diesem Kapitel jeweils diskutiert.

- Untersuchung zweier PHA-Produzenten zur Verwertung von verschiedenen Substraten

Nach intensiver Literaturrecherche (~200 Literaturstellen) wurden am IGVP zwei Mikroorganismen ausgewählt, welche mit verschiedenen Anteilen der in dem Projekt anfallenden Substraten effizient umgehen können. Genutzt wurden ein *Cupriavidus necator*, der Glucose als Kohlenstoffquelle nutzen kann und hohe intrazelluläre PHA-Anteile auf volatilen Fettsäuren und Glucose (>70 %) einlagert (Sheu et al. 2018, Arenas-López et al. 2019), und zusätzlich *Burkholderia glumae*, welcher ebenfalls mit verschiedenen Zuckern und volatilen Fettsäuren eingesetzt werden kann (Yu et al. 2009). Die Wachstumsphasen beider Organismen wurden im Mikrobioreaktorsystem untersucht. Die gezeigten Kurven (Abbildung 39) wurden mit einer erweiterten Monod-Kinetik für Substratinhibierung nach Han und Levenspiel (1988) an die Messdaten angepasst.

Es wurde ermittelt, dass beide Organismen ihr Optimum an Ammoniumsalz unter 1 g L⁻¹ besitzen. Die gewählten Werte von 1,2 g L⁻¹ in den MS-Vorkulturen und 2,4 g L⁻¹ in den Hauptkulturen stellen damit einen Kompromiss zwischen akzeptablen Wachstumsraten und einer erhöhten erreichten Biomasse dar. Obwohl *B. glumae* auf Glucose eine mehr als doppelt so hohe Wachstumsrate als *C. necator* aufweist (Abbildung 39c) und für die Verwertung von Xylose geeignet ist (siehe Abbildung 39b), bietet *C. necator* aufgrund seiner höheren Säureaffinität erhebliche Vorteile für die Skalierung. In Abbildung 39d erkennt man, dass sich *C. necator* als geeignetster Organismus abzeichnet, da er ein Optimum der spezifischen Wachstumsraten bei $c_{\text{Säure}} = 1,8 \text{ g L}^{-1}$ Lävulinsäure aufweist, während das Optimum von *B. glumae* unter der kleinsten gemessenen Konzentration von $c_{\text{Säure}} = 0,5 \text{ g L}^{-1}$ liegt. Diese höhere Säureaffinität erlaubt größere Toleranzen in der Zudosierung ohne die Gefahr von Toxizität. Dies ist gerade in größeren Maßstäben essentiell. Daher wurden für alle Fermentationen *C. necator* als Produktionsstamm ausgewählt.

- Entwicklung und Skalierung des Fermentationsprozesses

Am IGVP wurde für die Skalierung der Organismus *C. necator* gewählt. Zum einen zeigte dieser eine deutlich höhere Säuretoleranz als *B. glumae*. Zum anderen zeigten Tanadchangsaeng und Yu (2013) und Sheu et al. (2018), dass *Cupriavidus* Stämme auf der genutzten Modellschubstanz Lävulinsäure ein Co-Polymer mit 3-Hydroxyvalerat (3-HV) und 4-Hydroxyvaleratanteilen (4-HV) bildet, welches verbesserte mechanische Eigenschaften aufweist als die klassischen Copolymer aus 3-Hydroxybutyrat (3-HB) und 3-Hydroxyvalerat. Die Modellschubstanz wurde gewählt, um die Skalierung im Prozesszeitraum abschließen zu können, ohne auf repräsentative Prozesswasserproben angewiesen zu sein. Da Lävulinsäure sowohl als Vorstufe zu Hydroxybutyrat, als auch zu Hydroxyvalerat dienen kann, eignet sich diese sehr gut zur Produktion von Copolymer (Sheu et al. 2018, Arenas-López et al. 2019, Yu et al. 2009). Die wichtigsten Ergebnisse zu Wachstum und Produktion für alle Fermentationen befinden sich in Tabelle 5. Erfreulicherweise konnte durch den optimierten erhöhten Produkttiter der Meilenstein 7.1.4 (1 kg PHA) bereits in einem 75-L-Fermenter anstatt in einem 300-L-Fermenter erreicht werden. Die nächste Skalierung wurde bei einem externen Dienstleister durchgeführt. Lt Richtpreis (Angebot 2021) sollten 3 Fermentationen im 1 m³-Maßstab durchgeführt werden, das Angebot 2024 zeigte jedoch nur die Möglichkeit für 2 Fermentationen.

Daher konnten nur 9 kg PHA im Fermenter erreicht werden. Durch Verluste bei der Separation, Trocknung und bei der Extraktion gab es einen Verlust von 30 %, was in einer ersten Pilotierung im erwartbaren Rahmen liegt, jedoch in Folgeprojekten verringert werden sollte. So konnten 6 kg PHA (Meilenstein 7.1.5) an das IKT geliefert werden. Es wurde mit dem IKT vorab abgeklärt, dass die Kompaktcharakterisierung auch mit dieser im Vergleich zu den ursprünglich geplanten 10 kg verringerten Menge vollständig durchführbar sind.

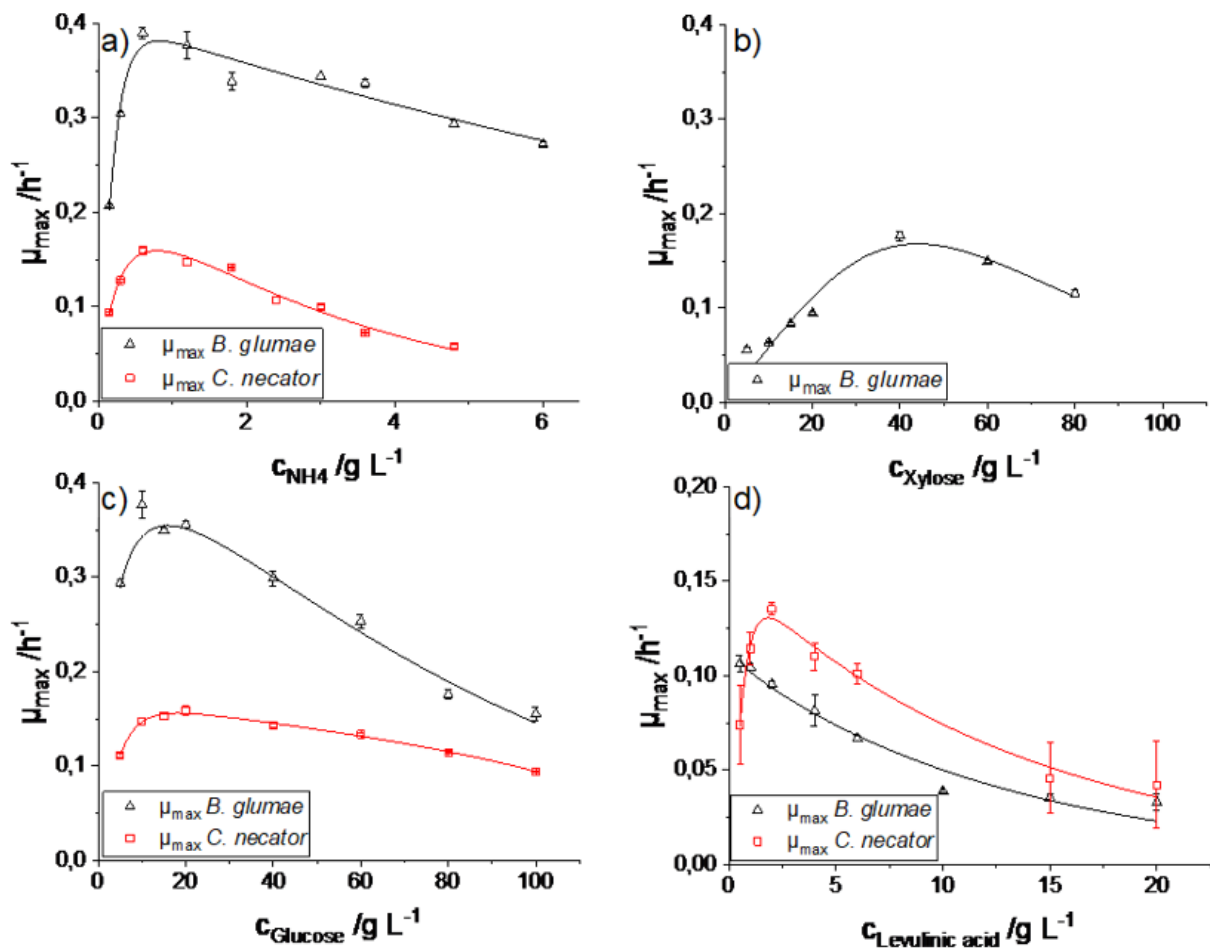


Abbildung 39: Wachstumsraten von *C. necator* (□) und *B. glumae* (Δ) in Abhängigkeit von der Substratkonzentration. Kohlenstoffvariationen aufgenommen mit 1,2 g L⁻¹ Ammonium als Stickstoffquelle, Stickstoffvariationen mit 10 g L⁻¹ Glucose als Stickstoffquelle

Tabelle 5: Fermentationsparameter und Ergebnisse in verschiedenen Maßstäben, Ungenauigkeit angegeben als Standardfehler, produzierte Polymermenge als Masse bei Fermentationsernte, Aufreinigungsausbeute nicht einberechnet

Maßstab	1.4 L	7-L**	42 L	75 L	1000 L
Parameters					
Arbeitsvolumen _{Start} / L	1	5	23	45	530 / 550
$c_{x, \text{final}} / \text{g L}^{-1}$	43,2 ± 1,1	40,3	32,7 ± 0,66	34,8	24 / 19,3
$c_{\text{PHA, final}} / \text{g L}^{-1}$	33,4 ± 1,3	35,6	24,7 ± 0,54	26,0	8,2 / 7,8
$m_{\text{PHA, intrazellulär}} / \text{g}$	36,7 ± 1,4	201	582 ± 58***	1361	4630 / 4458
$\text{PHA}_{\text{final}} / \% \text{TS}$	76 ± 3	89	75	75	34 / 40
$3\text{-HB}_{\text{final}} / \% (\text{w/w})$	62,2 ± 2,6	65,4	51,8*	43,9	32,4 / 30,1
$3\text{-HV}_{\text{final}} / \% (\text{w/w})$	32,1 ± 1,0	34,6	46,2*	54,9	66,7 / 67,7
$4\text{-HV}_{\text{final}} / \% (\text{w/w})$	2,1 ± 0,1	k.A.	2,0*	1,2	0,9 / 2,1
$Y_{X/\text{Gluc}} / \text{g}_X \text{ g}_{\text{Glucose}}^{-1}$	k.A.	0,41	0,35 ± 0,01	0,28	0,37 / 0,44
$Y_{\text{P/Lävulinsäure}} / \text{g}_{\text{PHA}} \text{ g}_{\text{LA}}^{-1}$	k.A.	0,41	0,38*	k.A.	0,13 / 0,19
$Q_{\text{PHA, max}} / \text{g}_{\text{PHA}} \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$	k.A.	1,7	1,1	0,7	0,3 / 0,2
	*Nur Wiederholung mit 4-HV Analytik gezeigt	**Keine 4-HV Analytik	*** stark beeinflusst von der Anzahl und dem Volumen an genommenen Proben		

Mit steigendem Prozessmaßstab nahmen die erreichten Biomassen ab, während der HV-Anteil anstieg. Dieses Verhalten ist aus der Literatur nicht bekannt. Um Einflussgrößen für den Anstieg des HV-Anteils zu identifizieren wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Der Zielparameter „3-HV-Anteil“ wurde mit 24 weiteren Variablen aus 8 Experimenten im 1-L – 550-L Maßstab korreliert. Alle Ergebnisse finden sich in Tabelle 14 (im Anhang 1). Da durch den großen Volumenunterschied zwischen Labor- und Pilotmaßstab die Korrelation stark von den zwei Pilotierungsdatenpunkten beeinflusst werden, sind ein Großteil der Parameter stark linear korreliert (Pearson-Koeffizient $r > |.7|$). Durch die Korrelationsmatrix zeigt sich jedoch, dass ein Einfluss der Fermentationszeit (t ($r=-.474$), der pH-Schwankungen ($r_{pHmax}=-.436$, $r_{pHmin}=-.039$), der Substrat- und Animpfkonzentrationen ($r_{Gluc}=-.117$, $r_{LA}=-.259$, $r_X=0.580$) und des Sauerstoffs ($r_{O2}=.511$) unwahrscheinlich sind. Die Variable mit der stärksten linearen Korrelation ($r=.964$) war die errechnete CO₂ Löslichkeit, welche sich aus dem hydrostatischen Druck bei 50 % der Flüssigkeitshöhe und dem Kopfraumdruck ergibt. In den Laborreaktoren (1 L und 5 L Flüssigvolumen) wurde hier von einem Kopfraumdruck $p \approx 0$ bar ausgegangen. Während diese beiden Parameter ebenfalls stark positiv korreliert sind ($r_{Kopfraum}=.959$ und $r_{Hydrostatisch}=.951$), ist es interessant, dass die Gaslöslichkeit eine noch stärkere Korrelation aufweist. Dies deutet auf eine Modulierbarkeit des Metabolismus über diese Parameter hin. Dies muss in Folgeprojekten bestätigt und näher charakterisiert werden, um gleichbleibende Polymereigenschaften zu gewährleisten.

- Übertragung der Zufütterungsstrategie auf ein Mischsubstrat

Es wurden zwei Kampagnen Flüssigphase der TDH aus AP 2 chromatografisch auf Ihre Hauptbestandteile untersucht. Hierbei konnten in der Kampagne aus Vorversuchen der Universität Hohenheim (LAB) aufgrund der starken Verdünnung und der nicht gefrorenen Lagerung keine Kohlenstoffmengen nachgewiesen werden. Mit den Proben aus Oktober 2023 konnte mittels Berechnungsindex-Detektor (RI-Detektor) die Kohlenstoffquellen in Tabelle 6 zugeordnet und quantifiziert werden. Hier wurden Überstände aus zwei separaten Probenflaschen untersucht. Basierend auf der bereitgestellten TDH-Prozesswässer wurde ein synthetisches Mischsubstrat mit vergleichbarer Zusammensetzung erstellt. Die Zusammensetzung ist ebenfalls Tabelle 6 zu entnehmen. Mit dem synth. Mischsubstrat konnte mittels der beschriebenen Zufütterungsstrategie ein maximaler intrazellulärer PHA Gehalt von 72 % mit einem 3-HV Anteil von 15 % (w/w) erreicht werden. Während der intrazelluläre PHA Gehalt vergleichbar mit den im Labormaßstab erreichten Werten auf der Modellschubstanz Lävulinsäure (Tabelle 5) ist, liegt der 3-HV Anteil deutlich niedriger. Dies war zu erwarten, da von den im Mischsubstrat eingesetzten Substraten nur Propionat und Valerat (Berezina 2012, Berezina und Yada 2016) als 3-HV-Vorstufe dienen können. Am Ende der Fermentation lagen nur die Kohlenstoffquellen Xylose und Lactat akkumuliert vor. Diese wurden in der Menge nachgewiesen, welche über den Fermentationsverlauf zugegeben wurde, was zeigt, dass *C. necator* diese nicht verstoffwechseln kann. Alle anderen Substrate konnten am Ende der Fermentation nicht oder in niedrigen Konzentrationen ($< 0,5 \text{ g L}^{-1}$) nachgewiesen werden. Dies bedeutet, dass mit der etablierten Zufütterungsstrategie eine Akkumulation volatiler Fettsäuren erfolgreich verhindert werden konnte.

Tabelle 6: Charakterisierung der erhaltenen Prozesswässer der Thermodruckhydrolyse und Zusammensetzung des synthetischen Mischsubstrates

Probe	Glucose / g L^{-1}	Xylose / g L^{-1}	Formiat / g L^{-1}	Butyrat / g L^{-1}	Actetat / g L^{-1}	Lactat / g L^{-1}	Propionat / g L^{-1}	Valerat / g L^{-1}
Vorversuche der UHH	0	0	0	0	0	0	0	0
Probe Oktober 2023, Überstand 1	0.17	0.18	0.33	0.42	0.88	0.43	0.34	0.2
Probe Oktober 2023, Überstand 2	0	0	0.79	0.65	1.29	0.51	0.68	NA
Synthetisches Misch- substrat	26.4	32.6	34.1	36.8	46.3	28.2	32.3	30.8

- PHA Aufreinigung

Am IGVP wurde die Aufreinigung optimiert. Die traditionellen Methoden zur Extraktion von PHAs, wie z. B. die Behandlung mit Chloroform, stellen ein Risiko für die Umwelt und die Gesundheit dar. Diese Studie zielt darauf ab, eine nachhaltigere Extraktionsmethode zu optimieren, indem die Effizienz und Reinheit der PHBV-Gewinnung aus bakterieller Biomasse unter Verwendung alternativer Lösungsmittel bewertet wird, wobei Alkohol aufgrund seiner geringeren Umweltauswirkungen als Hauptkandidat gilt.

Auswirkungen des Verhältnisses von Biomasse zu Lösungsmittel auf die PHBV-Gewinnung Experimente ergaben, dass ein Verhältnis von Biomasse zu Lösungsmittel von 5 % in Alkohol die höchste Wiederfindung (WF) von $81,55 \pm 1,06 \%$ mit einer Reinheit von $96,32 \pm 3,87 \%$ ergab. Eine Erhöhung

des Biomasseanteils auf 10 % und 15 % führte zu deutlich niedrigerer WF von $52,88 \pm 1,56$ % bzw. $34,13 \pm 2,67$ %, während die Reinheit unabhängig von der Konzentration konstant bei 95 % lag. Der Rückgang der Wiederfindung bei höheren Biomasseanteilen könnte auf das Erreichen der Löslichkeitsgrenze von PHBV in Alkohol zurückzuführen sein, die qualitativ bei etwa 40-45 g L⁻¹ liegt. Um den Einfluss der Extraktionszeit auf die PHBV- WF und -Reinheit zu bewerten, wurden die Experimente für 1, 2 und 3 h bei einem konstanten Biomasse-zu-Lösungsmittel-Verhältnis von 5 % durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass die WF mit der Extraktionszeit signifikant anstieg und bei 3 h ein Maximum von $82,43 \pm 2,07$ % erreichte. Dies deutet darauf hin, dass eine längere Expositionszeit eine bessere Auflösung und Freisetzung von PHBV aus der Biomasse ermöglicht. Eine weitere Verlängerung der Extraktionszeit über 3 h hinaus könnte jedoch zu einer höheren Ausbeute führen, würde aber die Energiekosten erhöhen und wäre daher weniger nachhaltig. Vergleich mit konventionellen Lösungsmitteln Chloroform, das Standardlösungsmittel für die PHA-Extraktion, wies sowohl bei Raum- als auch bei Siedetemperaturen überragende WF von bis zu $95,45 \pm 1,32$ % auf, wenn auch mit Nachteilen für Gesundheit und Umwelt. Im Vergleich zu anderen Lösungsmitteln wie Dimethyl carbonate und Aceton, die WF von $33,26 \pm 0,77$ % bzw. $68,97 \pm 0,8$ % aufwiesen, bot Alkohol ein ausgewogeneres Verhältnis zwischen Effizienz und Umweltverträglichkeit. Darüber hinaus ist für die Ausfällung von PHBV mit Alkohol kein Ausfällungsmittel (Antisolvent) erforderlich, wodurch der Lösungsmittelabfall verringert und der Extraktionsprozess vereinfacht wird. Diese Studie bestätigt, dass Alkohol eine wirksame, umweltfreundliche Alternative für die PHBV-Extraktion aus bakterieller Biomasse ist, die eine hohe WF und Reinheit ohne die mit Chloroform verbundenen Gesundheitsrisiken bietet. Das optimierte Verfahren umfasst ein Verhältnis von Biomasse zu Lösungsmittel von 5 % und eine Extraktionszeit von 3 h, wodurch die Gewinnung bei akzeptablen Reinheitsgraden maximiert wird. Diese Methode hat das Potenzial für eine breitere Anwendung in der nachhaltigen Biopolymerproduktion, zumal der Alkohol mikrobiell hergestellt werden kann, was die Nachhaltigkeit des Prozesses weiter erhöht.

Eine Zusammenfassung aller Proben, die an das IKT übergeben wurden, ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: PHA-Proben, die am IGVP im Rahmen des BW2Pro-Projekts hergestellt wurden, und die an die IKT gesendete Mustermenge

Datum	PHA	Menge	Sender	Empfänger
Mar 2023	PHBV (Chloroform)	16 g	IGVP	IKT
Jul 2023	PHBV extrahiert mit verschiedenen Lösungsmitteln	5 Proben à 60 mg	IGVP	IKT
Aug 2023	PHBV extrahiert mit verschiedenen Alkoholen PHB mcl-PHA	5 Proben à 1 g 2,5 g 6,5 g	IGVP	IKT
Nov 2023	PHBV (Chloroform) PHBV (Alkohol)	17 g 83 g	IGVP	IKT
Mai 2024	PHBV (Alkohol) PHBV (Chloroform)	396 g 391 g	IGVP	IKT
Jul 2024	PHBV (Alkohol) PHBV (Chloroform)	137 g 78 g	IGVP	IKT
Okt 2024	PHBV (Alkohol)	6 kg	IGVP	IKT

PHA ist ein Biopolymer, das ein großes Potenzial hat, erdölbasierte Polymere zu ersetzen. Dieses Projekt trägt nicht nur dazu bei, Anwendungen für PHA zu finden, sondern ermöglicht auch die Erforschung weiterer biobasierter Produkte auf dem Markt, was auch dem Verbraucherschutz dient. PHA-Polymere werden von verschiedenen Industriezweigen wie der Verpackungsindustrie, dem medizinischen Sektor und der Textilindustrie nachgefragt. Seit dem Start des BW2Pro-Projekts sind zahlreiche Unternehmen an das IGVP herangetreten und haben ihr Interesse an PHA bekundet. Das IGVP wird die in diesem Projekt gesammelten Erfahrungen einsetzen, um in Zukunft neue Projekte zu akquirieren und neue Anwendungsmöglichkeiten für PHA in Kooperation mit anderen Partnern zu erarbeiten. Im Laufe dieses Projektes war es möglich bisher noch nicht dagewesene Mustermengen von Polyhydroxyalkanoat mit außergewöhnlich hohem 3HV-Anteil bereit zu stellen (Median Literaturredatenbank = 20 %, Kommerziell verfügbar zwischen 1-8 %). Dies ist ein wichtiger Schritt in der Charakterisierung des Polymers zu technischer Anwendung.

Die Ergebnisse zur PHA-Produktion könnten weiter genutzt werden und die Herausforderungen werden im Folgeprojekt untersucht. Die durchgeführten Arbeiten haben zu der Etablierung einer flexiblen Zufütungsstrategie in verschiedenen Reaktorsystemen beigetragen. Dies ermöglicht, mit Mischsubstraten PHAs ohne die Gefahr von Inhibierung zu produzieren. Das etablierte Verfahren kann in Zukunft dazu genutzt werden komplexe Substrat-Produkt-Matrizen zu entwickeln, welche eine gezielte Modifizierung der Polymerzusammensetzung ermöglichen sollen. Die Korrelationsanalyse zeigte einen Zusammenhang zwischen dem Reaktormaßstab und dem Copolymeranteil. Dieses Phänomen wird weiter untersucht werden, um bisher womöglich unbekannte Einflussfaktoren zu Modulierbarkeit der Produktkomposition zu finden. Diese beiden Vorhaben sollen in Kombination dazu beitragen, die PHA-Varianten, welche durch ihre Eigenschaften zur technischen Anwendung geeignet sind, aus günstigen Mischsubstraten in ausreichender Quantität herstellen zu können. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass wir erstmals kg-Mengen von einem neuen PHBV Polymer mit hohem HV Anteil für die Polymeranwendung zur Verfügung stellen konnten. Dies ermöglicht uns nun eine fortführende Projektakquise.

3.7.2 Aufbereitung von PHA (AP 7.2)

Autorin: Dr. Weinmann, S. (IKT)

Im ersten Schritt wurde eine Literaturrecherche zur Evaluierung geeigneter Additive für die Modifikation von PHB durchgeführt. Der Fokus lag dabei auf biokompatiblen Additiven, die einen weichmachenden Effekt ausüben, um die Dehnfähigkeit von PHB (ENMAT Y300P, TianAn Biologic Materials Co., China) zu erhöhen. Als Ergebnis der Recherche wurden Ester des Glycerins (Glycerintriacetat und -tributyrat) sowie ein Zitronensäureester (Tributylacetylcitrat) als besonders geeignet bewertet. Die Weichmacher wurden hinsichtlich ihrer Verarbeitungseigenschaften untersucht. Hierbei kamen vor allem die Differenzkalorimetrie (DSC) und Thermogravimetrische Analyse (TGA) zum Einsatz. Die Aufbereitung des PHB mit dem jeweiligen Weichmacher erfolgte anschließend in einem Doppelschneckenextruder vom Typ ZSK 18 (Coperion, Stuttgart). Die Konzentration des jeweiligen Weichmachers wurde dabei sukzessive von 5 M.-% auf 10 M.-% und letztlich auf 20 M.-% erhöht. Im Anschluss wurden die aufbereiteten PHB umfassend hinsichtlich ihrer thermischen, rheologischen und mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Aufgrund der Seitenzahlbegrenzung dieses Berichts können im Folgenden nur einige der relevanten Ergebnisse vorgestellt werden.

Hinsichtlich der thermischen Eigenschaften zeigte sich deutlich, dass sich mit steigendem Weichmacheranteil der Schmelz- als auch der Kristallisationsbereich zu niedrigeren Temperaturen hin verschiebt. Begründet liegt dies darin, dass sich der niedermolekulare Weichmacher zwischen die PHB-Polymerketten einlagert und sich damit die Abstände zwischen den Ketten vergrößern. Die größeren Abstände der Ketten schwächen die intermolekularen Wechselwirkungen der Ketten, sodass der Übergang zur Schmelze schon bei niedrigeren Temperaturen stattfinden kann. Umgekehrt können sich die Ketten bei Abkühlung weniger gut in kristallinen Strukturen anordnen, da der Weichmacher störend zwischen den Ketten wirkt. Dieser Effekt konnte vor allem bei der Verwendung von Glycerintributyrat und Glycerintriacetat beobachtet werden. Im Falle des Weichmachers Tributylacetylcitrat trat dieser Effekt ebenfalls ein, war aber weniger ausgeprägt (vgl. Tabelle 8). Die Temperaturerniedrigung des Schmelzbereiches ist insofern von Nutzen, dass die Verarbeitung der Compounds bei niedrigeren Temperaturen stattfinden kann. Der Prozess wird energieeffizienter, weil allgemein weniger thermische Energie aufgewendet werden muss.

Tabelle 8: Thermische Kennwerte der mit verschiedenen Weichmachern modifizierten PHB

Werkstoffe	T _m in °C	X in %	T _K in °C
PHB	177	60	122
PHB + 5 % Glycerintributyrat	173	62	120
PHB + 10 % Glycerintributyrat	171	45	118
PHB + 20 % Glycerintributyrat	168	49	114
PHB + 5 % Glycerintriacetat	173	56	121
PHB + 10 % Glycerintriacetat	171	56	118
PHB + 20 % Glycerintriacetat	170	43	113
PHB + 5 % Tributylacetylcitrat	175	58	121
PHB + 10 % Tributylacetylcitrat	172	59	119
PHB + 20 % Tributylacetylcitrat	169	56	117

T_m: Peakmaximum des Schmelzbereichs, T_K: Peakminimum des Kristallisationsbereichs, X: Kristallinität

Die Untersuchung der rheologischen Eigenschaften zeigte für beide Glycerinester einen viskositätsniedrigenden Effekt ab einem Weichmacheranteil von 10 M.-%. Durch die Einlagerung der Weichchermoleküle zwischen den PHB-Polymerketten haben diese nun einen höheren Bewegungsspielraum,

was sich in einer niedrigeren Schmelzeviskosität widerspiegelt. Bei Verwendung des Tributylacetylci- trats konnte dieser Effekt schon bei einer geringeren Konzentration von 5 M.-% beobachtet werden. Erste Screeningexperimente zur Blasfolienherstellung zeigten, dass sich der viskositätserniedrigende Effekt vorteilhaft auf die Herstellung von Blasfolien auswirkt.

Die eigentliche Aufgabe eines Weichmachers ist jedoch in erster Linie die Verbesserung der mechani- schen Eigenschaften. So konnte z. B. der E-Modul, der ein Maß für die Steifigkeit darstellt, von 4.100 Pa für reines PHB durch 20 M.-% Glycerintributyrat auf 1.500 Pa herabgesetzt werden. Ähnlich verhält es sich für das strukturell verwandte Glycerinacetat. Das Tributylacetylci- trats hingegen senkt den E-Modul weniger stark auf nur 3.500 Pa. Allen eingesetzten Weichmachern ist gemein, dass sie die Bruchdehnung des jeweiligen Compounds auf nahezu das Dreifache erhöhen. Je nach Einsatzzweck können beide Varianten, sowohl die Kombination von hoher Steifigkeit mit hoher Bruchdehnung, als auch die von niedriger Steifigkeit mit hoher Bruchdehnung, ein wünschenswertes Eigenschaftsprofil ergeben. Des Weiteren wurde die Kerbschlagzähigkeit bestimmt, welche ein Maß für die Energieaufnahmefähig- keit eines Werkstoffs unter stoßartiger Belastung darstellt. Es zeigte sich, dass die Kerbschlagzähigkeit von reinem PHB ($1,5 \text{ kJ m}^{-2}$) durch den Einsatz von Weichmachern auf Werte zwischen 4 und 5 kJ m^{-2} gesteigert werden konnte.

Zusätzlich zu den hier beschriebenen Aufbereitungsexperimenten wurden weitere Versuche mit ver- schiedenen Polyethylenglykolen (PEG) als innerer Weichmacher durchgeführt (Bonten 2020). Um eine Kopplung des PEG an die PHB-Polymerketten zu erzielen, wurde ein bifunktionseller Koppler eingesetzt. Diese Vorgehensweise führte ebenfalls zu PHB-Kunststoffen mit geringerer Steifigkeit und einer höhe- ren Bruchdehnung. Aufgrund der limitierten Seitenzahl des Berichtes, kann dies an der Stelle nur er- wähnt und nicht weiter ausgeführt werden.

Für die Herstellung der PHB/PHBV-Blends wurde als Reaktionsaggregat ein Minicomponenter verwen- det, um kleine Durchsätze von 100 g h^{-1} zu realisieren. So konnten auch mit einer Ausgangsmenge von $\sim 1 \text{ kg}$ PHBV Blends unterschiedlicher Zusammensetzung hergestellt werden. Zusätzlich wurden Blends hergestellt, denen während der Aufbereitung ein geeignetes Kopplungsagens beigemischt wurde, um eine chemische Bindung zwischen den Blendpartnern zu bewirken. Im Anschluss an die Aufbereitung wurden die Blends umfassend charakterisiert. Auch hier kann im Folgenden nur eine kleine Auswahl an Ergebnissen aufgezeigt werden. In Abbildung 57 (in Anhang 1) sind die Ergebnisse aus der thermischen Charakterisierung mittels DSC dargestellt. Während das Blend mit 25 M.-% PHBV einen Schmelzbe- reich - ähnlich dem PHB - bei 176°C (1. Aufheizrate) aufweist und eine um 6 K verringerten Kristallisa- tionsbereich, zeigen die Blends, die einen höheren PHBV-Anteil aufweisen, einen zusätzlichen breiteren Schmelzbereich bei niedrigeren Temperaturen, der durch das PHBV verursacht wird. Überraschend ist, dass selbst bei einem PHBV-Anteil von 75 M.-% der Schmelzbereich, der vom PHB herrührt, stark aus- geprägt ist. Dies könnte sich bei Produkten aus PHB/PHBV-Blends dahingehend positiv auswirken, dass auch noch bei höheren Temperaturen eine gewisse Formstabilität gegeben ist. Als Beispiel seien hier Becher für Heißgetränke genannt. Ebenfalls positiv zu bewerten ist, dass sowohl die Blends als auch das reine PHBV in ihrem Zersetzungsverhalten sehr dem PHB ähneln. Alle Biokunststoffe begin- nen sich erst oberhalb von 260°C zu zersetzen und somit weit über den Temperaturen, die bei der Verarbeitung von Kunststoffen mit industriellen Verfahren üblich sind.

Die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften ergab, dass die Schmelzviskosität aller Biokunst- stoffe in einem schmalen Bereich zwischen 400 und 800 Pas liegt, wobei die des reinen PHBV am niedrigsten ist. Allen Kunststoffen ist gemein, dass sie ab einer Frequenz von ca. 1 rad s^{-1} thermisch abbauen, was sich in wieder geringer werdenden Viskositätswerten zeigt. Dies ist typisch für Biokunst- stoffe und kann durch den Zusatz von Thermostabilisatoren sowie durch die Zugabe von speziellen Kettenverlängerern unterbunden werden.

Ein weiterer Schritt war die Charakterisierung der Blends hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften. Hierzu werden Prüfkörper benötigt, die üblicherweise im Spritzgießverfahren hergestellt werden, wofür pro Werkstoff eine Menge von ca. 2 kg benötigt wird. Da die zur Verfügung stehenden Menge pro Blend weitaus geringer war ($\sim 100 \text{ g}$ pro Blend), mussten die Prüfkörper mithilfe einer Schablone im Heißpress- verfahren hergestellt werden. Der Nachteil dabei ist, dass die Biokunststoffe länger höheren Tempera- turen ausgesetzt sind, als dies beim Spritzgießen der Fall ist. Dadurch ist der thermische Abbau ausge- prägter, was sich in einer gewissen Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften, wie z. B. der Bruchdehnung widerspiegelt. Des Weiteren kann es zu Lufteinschlüssen in den Prüfkörpern kommen, was zu größeren Schwankungen bei den Messwerten führt. Die Ergebnisse der mechanischen Prüfung ergaben trotz der Einschränkungen durch das Pressverfahren, dass ab einem PHBV-Anteil von 75 M.-% die Dehnung deutlich erhöht werden konnte (vgl. Tabelle 9). Aus den genannten Gründen ist die Streuung der Messwerte allerdings hoch.

Tabelle 9: Mechanische Kennwerte der PHB/PHBV-Blends

Werkstoffe	Zugfestigkeit in MPa	Dehnung in %
PHB/PHBV-Blend 25:75	23 ± 3	5 ± 2
PHB/PHBV-Blend 50:50	15 ± 0,4	5 ± 1
PHB/PHBV-Blend 75:25	9 ± 1	30 ± 28

Ein weiterer Ansatz war, dem steifen PHB als Weichphase das seit Kurzem am Markt verfügbare, dehnfähige und flexible Poly(3-hydroxybutyrat-co-4-hydroxybutyrat) (P(3HB4HB)) beizumischen. Es konnten PHB/P(3HB4HB)-Blends generiert werden, die bei einer Zusammensetzung von 50:50 eine Dehnung von 17 % und bei einer Zusammensetzung von 25:75 eine Dehnung von rund 300 % aufweisen. Damit sind sie industriell vielversprechend.

Um zu prüfen, ob die Aufbereitung einen Einfluss auf die Bioabbaubarkeit von PHB ausübt, wurden fünf verschiedene Werkstoffe dem Projektpartner ISWA für Bioabbaubarkeitstests übergeben. Aufgrund von Zeit- und Personalmangel war eine Untersuchung zur Abbaubarkeit von Biopolymeren innerhalb dieses Projektes nicht mehr möglich.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sind ein wichtiger Beitrag, um das Biopolymer PHB einer industriellen Nutzung zugänglich zu machen. Im Falle der Modifikation mit biogenen Additiven, insbesondere mit Weichmachern, konnten die mechanischen Eigenschaften deutlich verbessert werden, im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen, wie dem PP, weisen aber auch die modifizierten Compounds immer noch eine relativ niedrige Bruchdehnung auf. Dennoch zeigten erste Versuche, dass die Herstellung von Blasfolien mit diesen Compounds prinzipiell möglich ist. Im Falle der PHB/PHBV-Blends und PHB/P(3HB4HB)-Blends konnte die Dehnung dagegen derart gesteigert werden, dass sie mit PP durchaus vergleichbar ist und sie damit eine werkstoffliche Alternative darstellen. Die Aufbereitung der Compounds als auch die Herstellung der Blends mittels eines Doppelschneckenextruders sind grundlegend für die Produktion im industriellen Maßstab geeignet. Jedoch unterscheiden sich die im Labormaßstab verwendeten Doppelschneckenextruder in mehreren Faktoren von denen im industriellen Einsatz. Konkret können hier das freie Volumen, das L/D-Verhältnis, Verweilzeit und Durchsatz oder auch die Art der Abkühlung und Granulierung genannt werden. Nachdem im Labormaßstab die generelle Machbarkeit gezeigt werden konnte und die Rezepturzusammensetzung optimiert wurde, ist für den industriellen Prozess eine neue Auslegung notwendig, um trotz veränderter Prozessparameter ein Produkt mit gleichbleibend hoher Qualität herzustellen. Von entscheidender Bedeutung für die Marktfähigkeit von Biokunststoffen ist jedoch ihr Preis im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen. Um konkurrenzfähig zu sein und nicht nur für Nischenprodukte und Einzelanwendungen genutzt zu werden, muss sich der Preis der PHA deutlich reduzieren.

Im Hinblick auf das Erlangen von Klimaneutralität ist auch der Einsatz von Biokunststoffen als nachhaltige Alternative zu fossilbasierten Kunststoffen unumgänglich. Um diese Kunststoffe industrietauglich zu machen, ist die Optimierung deren Eigenschaften jedoch unabdingbar. Dass dies möglich ist, konnte im Rahmen des Forschungsprojektes am Beispiel von PHB gezeigt werden. Auf Basis dieser ersten Erfolge muss zukünftig dennoch weiter geforscht werden, beispielsweise müssen Rezepturen weiter verbessert werden. Zusätzlich schreiten aber auch aktuelle Entwicklungen auf Seiten der Polymerhersteller rasant voran und könnten ganz neue Lösungen bieten. Ein Beispiel ist das P(3HB4HB), das vor noch nicht allzu langer Zeit den Markt eroberte. Durch das Blenden von PHB konnten dessen Eigenschaften von steif und wenig dehnfähig hin zu flexibel und dehnfähig verändert werden. Dieses konkrete Beispiel zeigt, dass die Erkenntnisse dieses Projektes noch kein Abschluss des Forschungsthemas sind, sondern im Gegenteil Grundlagen schaffen, auf denen zukünftig neue Entwicklungen aufbauen können, um neue Werkstoffe zu generieren.

3.8 Ökologische Bewertung (AP 8)

Autoren: Reinhardt, J.; Veith, C. (ifeu)

Die Ergebnisse in der Wirkungskategorie „Treibhauseffekt“ für die Fasernutzung ohne vorherige Trennung von Fasern und Pülpe, aufgeschlüsselt nach Prozessen (Abbildung 40), zeigen ein klares Bild: Die Belastungen durch die Topfproduktion (nach oben gerichtete Säulen in den ersten beiden Szenarien) werden deutlich von den Entlastungen übertroffen. Diese resultieren aus der vermiedenen Kunststoffproduktion sowie der endgültigen Entsorgung bzw. Ausbringung der fossilen Materialien Kunststoff bzw. Torf (Gutschriften (GS)). Das direkte Mulchen ist hingegen weder mit großen Lasten noch Entlastungen über Humusreproduktion und Düngewirkung verbunden, so dass durch Nutzung in der Topfproduktion netto deutlich größere Entlastungen erzielt werden.

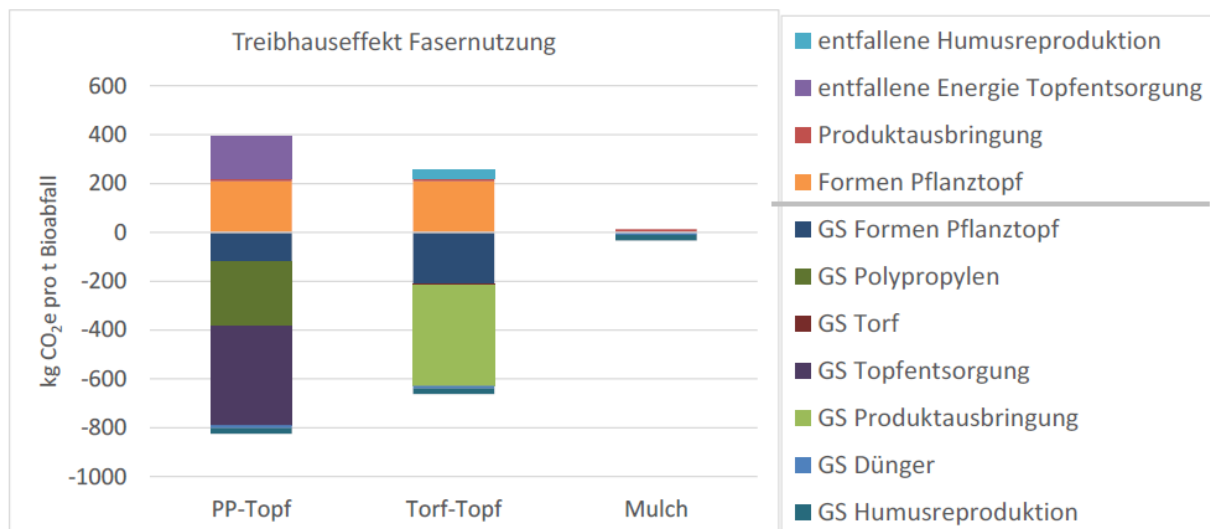


Abbildung 40: Prozessdifferenzierte Ergebnisse im Treibhauseffekt für die Fasernutzung ohne vorausgehende Faser- und Pülpentrennung

Bei Betrachtung der weiteren Wirkungskategorien und Indikatoren zeigt sich, dass die Substitution von Töpfen aus Kunststoffen mit größeren Vorteilen als die Substitution von Torftöpfen verbunden ist, weil die Torfzersetzung sich v.a. im Treibhauseffekt nachteilig niederschlägt. Die Kunststoffsubstitution zeigt hingegen Vorteile in mehreren Indikatoren. Das direkte Mulchen schneidet relativ besser ab als beim Treibhauseffekt, weil sich die Vorteile der Substitution fossiler Materialien v.a. dort zeigen, so dass teilweise Vorteile im Vergleich zur Torftopfsubstitution resultieren.

Die Nettoergebnisse im Treibhauseffekt für die Pülpennutzung werden von der verbleibenden Fasernutzung wenig beeinflusst, wenn diese als direktes Mulchen stattfindet. Eindrücklich ist in Abbildung 41 ersichtlich, wie stark die Ergebnisse von der Aufskalierung abhängen und wie unsicher sie entsprechend sind. Die auf Großmaßstab aufskalierten Nettoergebnisse zeigen Vorteile für die Nutzung der Pülpe von Cellulasen auf dem Markt gegenüber Vergärung und PHA-Biokunststoffproduktion. Dabei spielt aber die Nährstoffrückgewinnung von Ammoniumsulfat aus der in der Cellulaseproduktion zugegebenen Ammoniaklösung eine große Rolle. Die Vergärung ist etwas vorteilhafter als die PHA-Produktion. Der beste Einsatz der Cellulasen ist aber nicht der externe Markt, sondern die interne Zuckerproduktion bis zur maximalen internen Faserverfügbarkeit (5,07 % der Pülpe), weil die dadurch substituierte Zuckerlast größer als die Gutschrift für substituierte konventionelle Cellulase ist (Vergleich *CellulaseZuckerPHA* und *CMstattCZuckerPHA* sowie *PHA*). Der Einsatz der Cellulasen in der Vergärung bietet hingegen keine Vorteile, weil die Verbesserungen in der Vergärung hierdurch kleiner sind als die Lasten der internen Produktion der Cellulasen (Vergleich *CellulaseVergärung* mit *Vergärung* sowie *CMstattCVergärung*). Die eingesparten Lasten der durch Abgabe an den Markt substituierten konventionellen Cellulaseproduktion überwiegen die Verbesserungen durch Cellulasen in der Vergärung entsprechend.

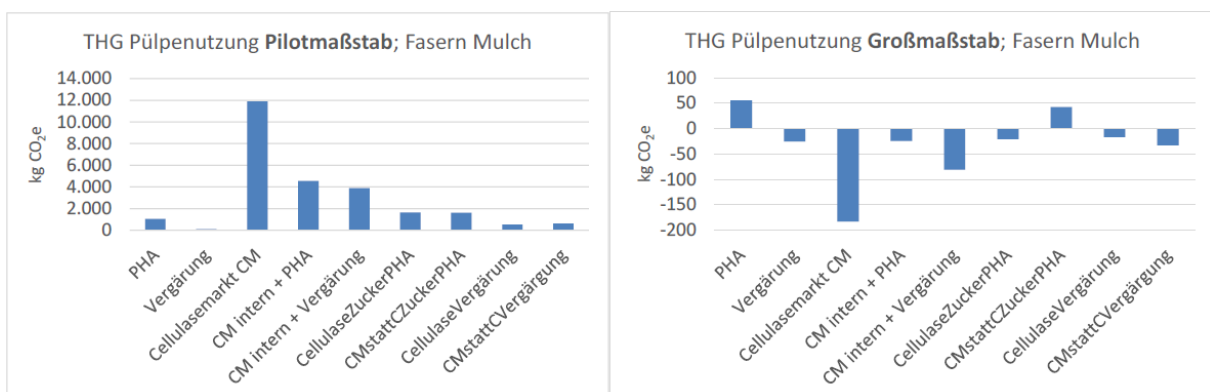


Abbildung 41: Ergebnisse im Treibhauseffekt für verschiedene Szenarien der Pülpennutzung bei Nutzung der verbleibenden Fasern als Mulch: Nettoergebnisse Pilot- und Großmaßstab

Die Lasten für Aufbereitung und Thermodruckhydrolyse sowie Nährstoffrückgewinnung fallen relativ klein aus, wobei die Nährstoffrückgewinnung netto mit Vorteilen verbunden ist (Abbildung 42). In der

Cellulaseproduktion schlagen insbesondere die Lasten für die Bereitstellung des Antischaummittels zu Buche (approximiert über Polydimethylsiloxan) (Abbildung 43) und dies sowohl in der internen als auch der konventionellen Cellulaseproduktion. Gleiches gilt für den nächstgrößten Lastenposten durch den eingesetzten Ammoniak, welcher in BW2Pro aber zusätzlich durch die anschließende Produktion von Ammoniumsulfat in der Nährstoffrückgewinnung aus den Rückständen der Cellulaseproduktion ausgeglichen wird. In der PHA-Produktion wird ein Großteil der Lasten durch die Bereitstellung des benötigten Alkohols (approximiert über Ethanol) und Glucose verursacht. Die Ethanollasten variieren sehr mit der genutzten Quelle und sind entsprechend unsicher.

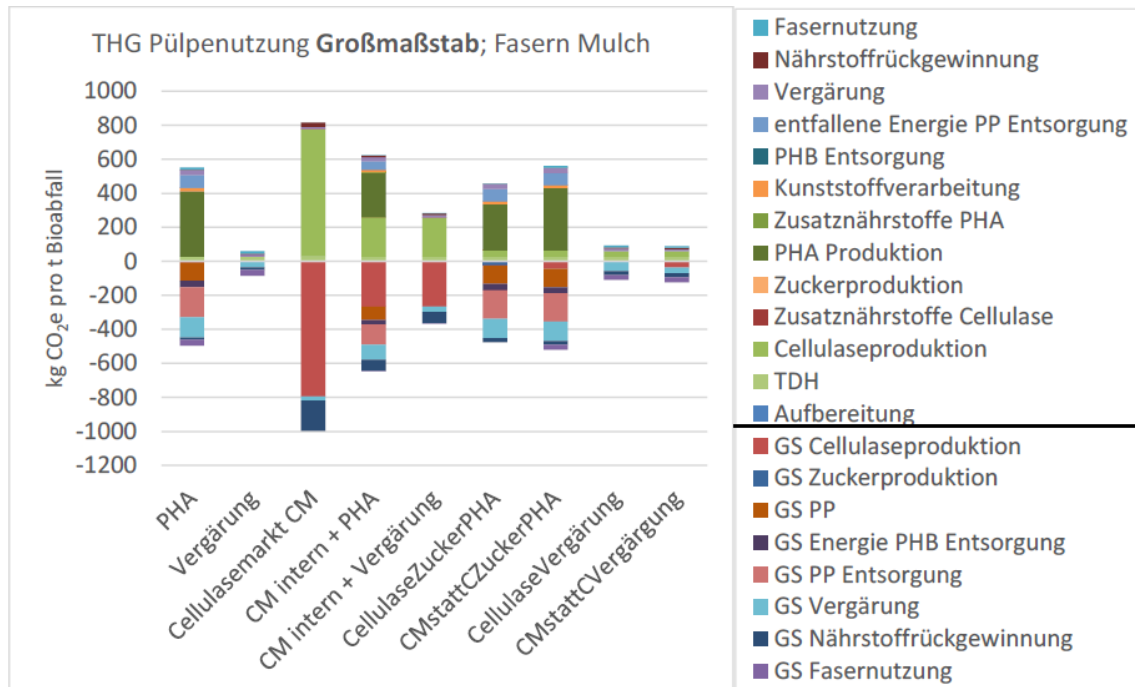


Abbildung 42: Ergebnisse im Treibhauseffekt für verschiedene Szenarien der Pülpenutzung bei Nutzung der verbleibenden Fasern als Mulch: Ergebnisse nach Prozessen

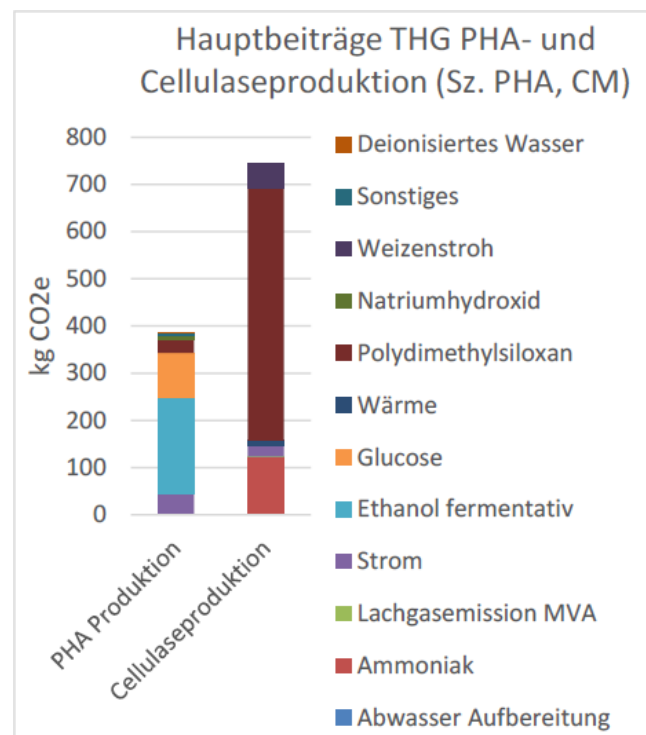


Abbildung 43: Ergebnisse im Treibhauseffekt für verschiedene Szenarien der Pülpenutzung bei Nutzung der verbleibenden Fasern als Mulch: Hauptbeiträge zum Lebenszyklus PHA- und Cellulaseproduktion in den Szenarien PHA bzw. Cellulasemarkt CM

Bei den weiteren untersuchten Indikatoren schneidet PHA relativ schlechter ab als im Treibhauseffekt. Auch die verschiedenen Szenarien zur Cellulasenutzung verschlechtern sich relativ gesehen etwas, weil die dadurch entfallene Fasernutzung als Mulch besser abschneidet als im Treibhauseffekt. Die Nutzung von Cellulasen als interner Zucker ist nicht mehr so vorteilhaft.

Wenn die verbleibende Fasernutzung optimalerweise in der Topfproduktion erfolgt (Unterstellung häufig Substitution von Kunststoff- und Torftöpfen), lassen sich mit den meisten Pülpeszenarien deutlich höhere Nettoeinsparungen im Treibhauseffekt erzielen, weil ein Großteil der Nettoeinsparungen dann aus der verbleibenden Fasernutzung resultiert (Abbildung 44). Dies bedingt, dass alle Pülpeszenarien, die Fasern aus der externen Fasernutzung abziehen (Cellulasen, interne Zuckerproduktion), entsprechend schlechter abschneiden, so dass sich die Reihenfolge stark verändert. Die direkte Vergärung ist jetzt vorteilhaft. Die Nutzung von intern produzierten Cellulasen in der Zuckerproduktion aus internen Fasern ist jetzt aufgrund der dadurch abgezogenen Fasern nicht empfehlenswert.

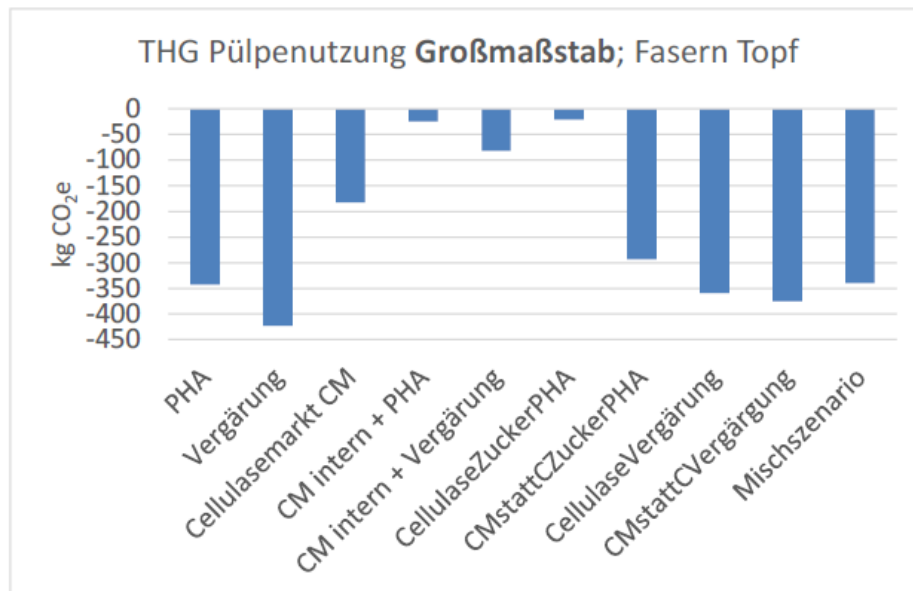


Abbildung 44: Ergebnisse im Treibhauseffekt für verschiedene Szenarien der Pülpenutzung bei Nutzung der verbleibenden Fasern in der Topfproduktion

In den anderen Indikatoren relativiert sich der Nachteil für die Szenarien, die interne Fasern nutzen, aber wieder, weil die dadurch entfallene Topfproduktion mit ihren Substitutionen im Treibhauseffekt relativ besser abschneidet als in den weiteren Indikatoren.

Als beste Mischung für den Treibhauseffekt ergibt sich somit die Fasernutzung in der Topfproduktion und die direkte Vergärung der Pülpe. Die Cellulaseproduktion aus internen Fasern bis zum Eigenbedarf für den Einsatz in der Vergärung bietet keine Vorteile, aber auch keine großen Nachteile. Die Produktion von PHA aus der Pülpe bei Fasernutzung in der Topfproduktion schneidet zwar insbesondere in den anderen Indikatoren schlechter ab als die direkte Vergärung der Pülpe, aber im Treibhauseffekt nicht so viel schlechter, solange der Zucker nicht aus internen Fasern produziert wird. Es bestehen viele Unsicherheiten. Zucker und eingeschränkt Cellulasen sollten nur begrenzt aus internen Fasern hergestellt werden, wenn die Fasernutzung zur Pflanztopfproduktion erfolgt. Bei Nutzung der Fasern als Mulch gilt Gegenteiliges.

Ein fast optimales Mischszenario, das eine breite Produktpalette ermöglicht, umfasst die Verwendung der Fasern in der Topfproduktion, während etwa 65 % der Pülpe direkt in der Vergärung eingesetzt werden. Zusätzlich werden 4,51 % der Pülpe zur Herstellung einer optimalen Cellulasemenge für die Vergärung genutzt und die restlichen 30 % der Pülpe fließen in die PHA- und Biokunststoffproduktion ein. Mit diesem Mischszenario lassen sich im Treibhauseffekt im aufskalierten Maßstab höhere Einsparungen erzielen als über die standardmäßige Bioabfallvergärung (Abbildung 45).

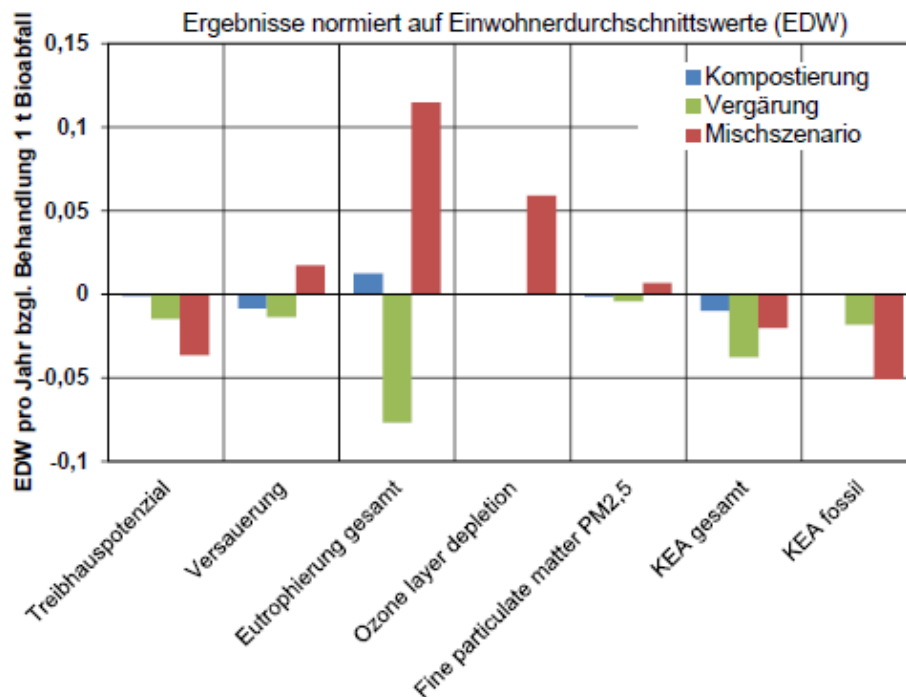


Abbildung 45: Normierte Ergebnisse für das abgeleitete Mischszenario in allen Indikatoren (rote Säule) im Vergleich zur Kompostierung und Vergärung (blaue bzw. grüne Säulen)

Bei vielen weiteren Indikatoren sieht es umgekehrt aus. Die Ergebnisse sind hochgradig unsicher, weil sie sehr stark von den Annahmen zum skalierten Energieverbrauch und von den Szenarien abhängen. Belastbare Aussagen lassen sich daher erst über eine ökologische Bewertung einer großtechnischen Anlage und deren Energie- und Betriebsmittelbedarfe treffen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Weiterverfolgung eines großmaßstäblich umgesetzten BW2Pro-Konzeptes aus ökologischer Sicht lohnen könnte.

3.9 Ökonomische Bewertung (AP 9)

Autor: Dr. Eltrop, L. (IER)

Die ökonomische Analyse wurde auf der Basis einer sorgfältigen technischen Beschreibung und Prozessanalyse der Teilprozesse und des Gesamtprozesses der Versuchsanordnung vorgenommen. Hierzu wurden (gemeinsam mit ifeu in AP 8) Energieflussdiagramme erstellt und mit technischen und ökonomischen Parametern versehen. In Abbildung 46 ist dazu beispielhaft ein Sankey-Diagramm des Gesamtprozesses dargestellt, auf dem die Komponenten und – bezeichnet durch die Dicke der verbindenden Pfeile – der Massenfluss der Biomasse eingezeichnet ist. Dargestellt ist dabei eine hypothetische Verknüpfung der Teilprozesse, wie sie vorgesehen sind aber nicht notwendigerweise auch tatsächlich verknüpft waren.

Der Hauptteil des Input-Materials würde danach in der TDH vorbehandelt und dann in der Biogasanlage weiterverarbeitet. Die TDH arbeitet im Batch-Verfahren. Für die ökonomische Analyse wurde angenommen, dass in einer gesamtheitlichen Anlage zwei TDH-Aggregate erforderlich sind, die im Wechselbetrieb den Gesamtprozess kontinuierlich mit Material versorgen. Aus der TDH wird der Großteil des Materials in eine Biogasanlage zur weiteren Verarbeitung verbracht, die mit einer Leistungsgröße von 260 kW dimensioniert wurde. Ein Teilstrom aus der TDH-Anlage wird für die Faserseparation bzw. auch für die Cellulaseproduktion abgezweigt. Für die Faserherstellung wird mit einer Standardanlage SteamFiber 05 mit einem Durchsatz von 5.000 t/a Biomasse gerechnet (Empfehlung H. Dauser von Fibers365). Für die Polymerproduktion bzw. -aufbereitung wird ein Teilstrom aus dem Input genommen bzw. auch aus der TDH entnommen.

Der Haupt-Biomassestrom wird in einer Biogasanlage verarbeitet, die mittels BHKW Strom erzeugt. Der Gärrest wird zum Schließen des Nährstoffkreislaufes aufbereitet und wird als ‚Output‘ der Biogasanlage entsprechend verwertet. Detaillierte Mengenangaben zu den einzelnen Teilströmen, die für eine ökonomische Bewertung entscheidend sind, waren zunächst kaum bzw. später nur mit großer Unsicherheit festzustellen. Sie wurden durch Annahmen gemeinsam mit ifeu (AP 8) schließlich konsolidiert. Die In-

vestitionskosten der Komponenten und Betriebskosten wurden schließlich in einer tabellarischen Darstellung gesammelt und für die Wirtschaftlichkeitsrechnung verwendet. Für die Kostenrechnung wurde als Referenz die gegenwärtige Abfallgebühr in den Landkreisen Rems-Murr und Ludwigsburg herangezogen.

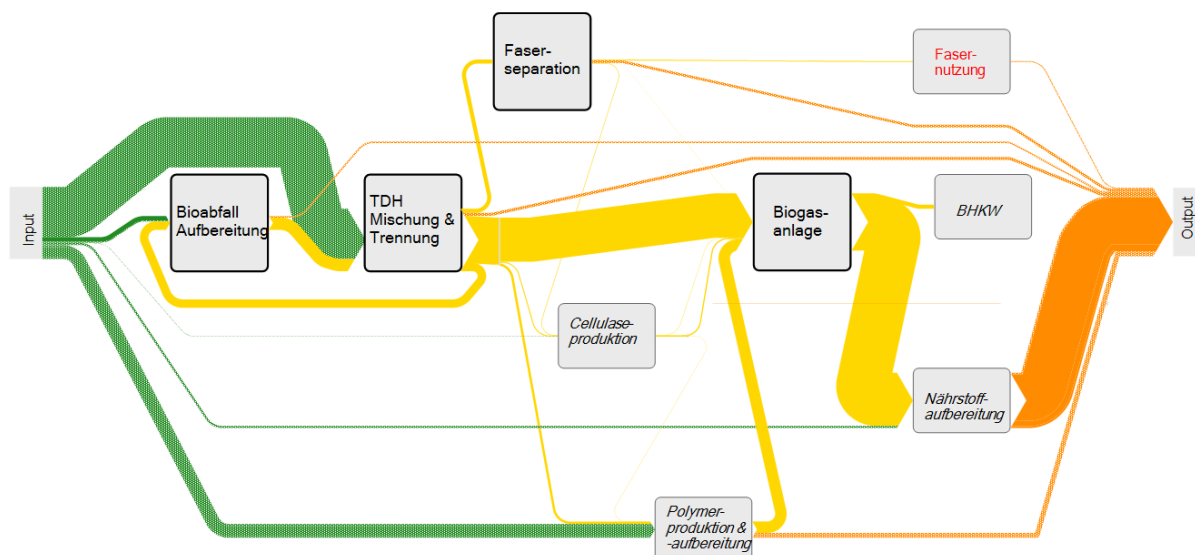


Abbildung 46: Materialflussdiagramm und Massenbilanz des Gesamtprozesses – Beispiel eines Sankey-Diagramms zur Veranschaulichung der Systemkomponenten und ihrer mengenmäßigen Verknüpfung.

Hierdurch errechnet sich ein Referenzwert von 52,12 EUR pro t Bioabfall. Bei einem Standardfall von 5.000 t Abfalldurchsatz pro Jahr sind dies dann 260.600,- EUR an Einnahmen, die ein Betrieb mit dieser Größe erlösen kann. Hinzu kommen ggf. weitere Einnahmen aus dem Verkauf an Strom (und ggf. Wärme) und z.B. auch den Gärresten. Es wird angenommen, dass es sich um eine Biogasanlage handelt, deren Gärreste z.B. nach einer Hygienisierung als Kompost gemäß BioAbfV verwertet werden können. Für die Erträge aus dem Verkauf von Gärrest-Komposten wird gemäß Tabelle 11 mit 14 EUR/t gerechnet.

Tabelle 10: Struktur und Gebühr für Bioabfallentsorgung in den Kreisen Rems-Murr und Ludwigsburg

Kreis	Größe [l]	Kosten[€/Jahr]	l/Jahr	€/t
Ludwigsburg	60	78	3120	277,05
Ludwigsburg	120	109,2	6240	158,53
Ludwigsburg	240	156	12480	94,26
Rems-Murr	80	26	4160	113,46
Rems-Murr	120	39	6240	83,97
Rems-Murr	240	78	12480	54,49
Durchschnitt				52,12

Tabelle 11: Preise für Komposterde (Stand: Januar 2023)

	Kompostart	EUR/m³	EUR/t
1	Gütekompst	11,90	17,00
2	Komposterde	18,20	14,00
3	Kompostsäcke	4,00 (f 30 l)	-

Für die Biogasanlage wird bei einer Leistung von 250 kW mit Investitionskosten von ca. 1,574 Mio. EUR gerechnet. Dabei wird eine Lebensdauer von 20 Jahren, und für den baulichen Teil von 40 Jahren angenommen (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12: Investitionskosten für die Biovergärungsanlage

	Komponente	EUR
1	Gärbehälter	1.000.000
2	BHKW	350.000
3	Einhausung und Peripherie	274.609
4	Gesamt	1.574.609

Tabelle 13: Gesamtinvestitionskosten

Mio. EUR	Biogas-anlage	Biomasse-Aufbereitung	TDH	Faserge-winnung	Cellulase-produktion	PHA-Pro-duktion	Gesamt
	1,57	0,085	2,24	3,45	1,50	1,50	10,34

In ähnlicher Weise wurden alle anderen Komponenten mit Investitions- und Betriebskosten beziffert. Dazuhin wurde eine Skalierung vorgenommen, die annähernd die Größe einer Anlage mit 5.000 t pro Jahr (siehe Skalierung Fasertrennung) bzw. einer Leistung von 250 kW ausmacht. Die gesammelten Angaben ergaben bei Kombination aller Module in einem Gesamtsystem Gesamt-Investitionskosten von über 10. Mio. EUR (vgl. Tabelle 13).

Aus dieser Gesamtaufstellung heraus wird deutlich, dass eine kombinierte Gesamtanlage mit sehr hohen Investitionskosten zu veranschlagen ist. Nicht berücksichtigt sind hier die laufenden Betriebskosten, aber ebenso wenig die möglichen Einnahmen für die eher ungewöhnlichen Produkte wie PHB oder Cellulasen. Hier ist eine mögliche Einnahme nur sehr schwer abzuschätzen, da im Vergleich mit biotechnologisch hergestellten Produkten die Qualität des Produktes aus unserer Anlage eine besondere Rolle spielt.

Viele der den o.a. Berechnungen zugrunde liegenden Annahmen sind wenig robust und solide, so dass auf dieser Basis keine Wirtschaftlichkeitsrechnung, bzw. umfangreichere ökonomische Analysen erstellt werden konnten. Die vorläufigen Ergebnisse legen aber nahe, dass ein kommerzieller Betrieb gegenwärtig nicht möglich ist. Weitere Arbeiten müssen erfolgen um ein gemeinschaftliches Gesamtkonzept der Anlage mit allen Komponenten zu erarbeiten und durch eine geeignete Auslegung auch wirtschaftlich interessant zu machen. In der vorliegenden Arbeit konnten hierzu nur unzureichende Rechnungen erstellt werden.

3.10 Öffentlichkeitsarbeit und Transfer (AP 10)

Autoren: Baumgart, M. (LAB); Steffens, A. (ISWA)

Um die Ergebnisse des Projekts BW2Pro einer breiten Fachöffentlichkeit und interessierten Bürger*Innen zugänglich zu machen, wurden umfangreiche Öffentlichkeits- und Transfermaßnahmen durchgeführt. Ein zentraler Bestandteil war die wissenschaftliche und fachliche Öffentlichkeitsarbeit durch zahlreiche Vorträge während der Projektlaufzeit und darüber hinaus, in denen die Projektergebnisse präsentiert und diskutiert wurden. Ergänzend trugen Publikationen, etwa im Biogas-Journal, dazu bei, das Projekt bekannter zu machen und den Dialog zwischen Fachkreisen und der Öffentlichkeit zu fördern. Ein eigens produzierter Imagefilm vermittelt zudem die zentralen Inhalte und Ziele des Projekts. Darüber hinaus wurden zahlreiche Führungen durch die Pilotanlage in Backnang angeboten, die interessierten, auch internationalen, Besuchergruppen direkte Einblicke in die technische Umsetzung der Forschungsergebnisse ermöglichten.

Diese Maßnahmen trugen wesentlich dazu bei, das Projekt bekannt zu machen, Wissen zu vermitteln und die Akzeptanz bioökonomischer Prozesse zu stärken.

Eine Auflistung der Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit findet sich in Anhang 2.

4 Praktische Anwendbarkeit und Roll-out des Vorhabens

Voraussichtlicher Nutzen und Übertragbarkeit

Bisher wird Bioabfall überwiegend zu Kompost verarbeitet und als Sekundärrohstoffdünger genutzt. Lediglich etwa 20 % durchlaufen zusätzlich eine anaerobe Vergärung zur Energiegewinnung. Das Projekt BW2Pro setzt hier an und verfolgt das Ziel, Bioabfälle effizienter zu verwerten, indem sie in hochwertige Produkte wie Biokunststoffe, Fasern, Düngemittel und Biogas umgewandelt werden. Dank der modularen Bauweise des entwickelten Verfahrens lässt es sich nahtlos in bestehende Bioabfallanlagen integrieren, was die Skalierbarkeit und Übertragbarkeit auf weitere kommunale und industrielle Anlagen erheblich erleichtert.

Ein wesentlicher Vorteil ist, dass diese Technologien den Wertstoffkreislauf schließen, Bioabfall besser nutzen und gleichzeitig wirtschaftliche Mehrwerte schaffen können. Besonders für Städte und Gemeinden mit bestehenden Bioabfallvergärungsanlagen bietet sich die Möglichkeit, mit vergleichsweise geringen Investitionen neue Verwertungswege zu erschließen.

Das entwickelte Verfahren könnte wirtschaftlich attraktiv sein, da es eine zusätzliche Wertschöpfung aus bisher ungenutzten oder wenig effizient verwerteten Bioabfällen ermöglicht. Folgende Faktoren sprechen für die wirtschaftliche Umsetzbarkeit:

- Reduzierung der Entsorgungskosten: Kommunen und Unternehmen können Kosten für die Bioabfallentsorgung senken, indem sie Wertstoffe aus dem Material zurückgewinnen. Damit werden fossile Ressourcen geschont, und das Abfallprodukt wird in die verschiedenen Nutzungsformen aufgeteilt. Störstoffe wie Kunststoffteile, Steine und Sand können abgeschieden werden. Alle Produkte sind hygienisch einwandfrei, da sie die Thermodruckhydrolyse durchlaufen mit einer Temperatur von über 150°C und bei einer Einwirkzeit von mindestens 15 Minuten.
- Neue Einnahmequellen: Der Verkauf von Biokunststoffen, Naturfasern oder Düngemitteln kann zusätzliche Erlöse generieren.
- Nachhaltigkeitsanforderungen: Unternehmen, die nachhaltige Produktionsprozesse anstreben, können von diesen Recycling-Technologien profitieren, insbesondere im Kontext der EU-Kreislaufwirtschaftsstrategie.
- Fördermöglichkeiten: Öffentliche Förderprogramme auf nationaler und EU-Ebene könnten den Markteintritt erleichtern.

Damit die getesteten Technologien der BW2Pro-Pilotanlage in der breiten Praxis Anwendung finden, sind folgende Optimierungen entscheidend:

1) Technologie-Skalierung und technische Optimierungen

- Optimierung der Verfahren für industrielle Maßstäbe - mehr Durchsatz bedeutet weniger Energie pro Tonne Inputsubstrat.
- Entwicklung einheitlicher Standards für Prozessintegration.
- Verbesserung der Abscheidung von Störstoffen durch Hydrozyklon
- Wasserverbrauch aller Verfahrensschritte reduzieren und Wasser bestmöglich rückführen. Prüfen, inwieweit auf eine Verdünnung mit Wasser für verschiedene Verfahrensschritte (Hydrozyklon, TDH, Entstippung) verzichtet werden kann.
- Mechanische Bearbeitung der Faser durch den Entstipper erfordert hohe Energie und Wassereinzugabe – prüfen, inwieweit auf Entstippung verzichtet werden kann.
- Gewonnene flüssige Phase aus dem Prozess (Pülpe = $336 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ kg}_{\text{OTM}}^{-1}$) kann wirtschaftlich in einer zweistufigen Biogasanlage umgesetzt werden. Besonders interessant ist, dass der Energieverbrauch der gesamten Anlage gedeckt werden kann.
- Ein der Hydrolyse vorgeschaltetes Absetzbecken, das abgelassen werden kann, ist in Folgeprojekten einzuplanen. Sedimentablagerungen bereiten in der Biogasanlage mehrfach Probleme. Es ist von erheblichen Mengen an Sedimenten auch nach der Aufbereitung auszugehen (Pülpe oTS $83.82 \pm 1.97 \%$ TM). In der Faser ist dies nicht zu beobachten. Alternativ muss der Abscheidegrad des Hydrozyklons weiter erhöht werden.
- Alle Reaktoren in der Pilot-Biogasanlage werden per Pumpe durchmischt. Aufgrund der Sedimentanreicherung tritt ein erheblicher Verschleiß an den Pumpen auf. Die Ersetzung von Pumpen durch mechanische Rührwerke, vor allem im Hydrolysereaktor, ist sinnvoll, um die Biogasanlage unempfindlicher gegenüber Sedimenten zu machen.
- Es kommt in der Pilotanlage zu Verstopfungen der Rohrleitung aufgrund von Sedimenten. Dieses Problem kann mit einer Vergrößerung der Rohrleitungen, was bei einem Upscaling ohnehin notwendig ist, gelöst werden (Gülletechnik als Vorbild).

- Trocknung der Fasern als letzter Schritt vor der Pressung der Pflanztöpfe muss geprüft werden
– (Energiekosten einsparen).
- 2) Investitionen und Finanzierungsmodelle**
 - Zugang zu Förderprogrammen, kommunalen oder privaten Investitionen
 - Entwicklung wirtschaftlicher Geschäftsmodelle für Betreiber von Bioabfallanlagen
- 3) Regulatorische Anpassungen und Genehmigungsprozesse**
 - Anpassung von Umwelt- und Abfallgesetzen, um neue Verwertungswege zu erleichtern und zu fördern
 - Einbindung von Entscheidungsträgern aus Politik und Verwaltung
- 4) Markterschließung und Kooperationen**
 - Aufbau von Partnerschaften mit Kommunen, Entsorgungsunternehmen und industriellen Abnehmern der Fasern
 - Sensibilisierung der Öffentlichkeit und der potenziellen Kunden für die neuen Bio-Wertstoffe.

Die erfolgreiche Umsetzung dieser Maßnahmen könnte dazu beitragen, die Technologien aus BW2Pro weitflächig zu etablieren und langfristig eine landesweite nachhaltigen Bioabfallwirtschaft aufzubauen.

5 Fazit und Ausblick/Entwicklungsperspektive

Das Projekt "Biowaste to Products" (BW2Pro) stellt einen wichtigen Meilenstein in der nachhaltigen Bioökonomie und Bioabfallverwertung dar. Durch die Entwicklung und Erprobung innovativer Technologien zur ganzheitlichen stofflichen Verwertung von Bioabfällen trägt das Vorhaben dazu bei, die Ressourcennutzung zu optimieren und nachhaltige Kreislaufprozesse zu etablieren. Die erzielten Erkenntnisse und im Rahmen des Projektes weiterentwickelten Technologien bilden eine vielversprechende Grundlage für die breite Anwendung in der Praxis.

Die modulare Bioraffinerie des Projekts BW2Pro bietet eine flexible und skalierbare Lösung zur Verwertung von kommunalen Bioabfällen. Die Trennung in feste und flüssige Bestandteile sowie die weitere Verwertung zu Biokunststoffen, Fasermaterialien und Biogas demonstrieren einen innovativen Ansatz, der deutlich über herkömmliche Vergärungsverfahren hinausgeht.

Die erzeugten Sekundärrohstoffe – Fasern, Cellulasen, PHA und Biogas – sowie die hergestellten Endprodukte, darunter biologisch abbaubare Pflanzöpfe und Dünger, haben das Potenzial, bestehende Produkte auf fossiler Basis (z.B. Pflanzöpfe aus PVC) zu ersetzen und neue Märkte zu erschließen.

Ein zentraler Vorteil der entwickelten Prozesse liegt in ihrer Anpassungsfähigkeit an verschiedene Abfallströme und Rahmenbedingungen. Die Bioraffinerie kann an kommunale Bioabfallanlagen gekoppelt werden, um eine dezentrale und effiziente Nutzung organischer Abfälle zu ermöglichen. Dies eröffnet wirtschaftliche Perspektiven für Kommunen und Unternehmen, insbesondere in der Abfall- und Entsorgungswirtschaft, der Landwirtschaft und der biobasierten Naturfaserindustrie, könnte ferner die wirtschaftliche Attraktivität von Bioabfallanlagen steigern und eine effizientere Nutzung von Bioabfällen ermöglichen. Die durchgeführten ökologischen Analysen bestätigen das Potenzial der Technologien, während in ökonomischer Hinsicht noch Verbesserungsbedarf besteht. Allerdings könnte die Integration von Bioabfallverwertungsprozessen zur Fasergewinnung in bestehende Infrastruktur nicht nur die Kosten der Abfallentsorgung senken, sondern auch zusätzliche Einnahmequellen durch den Verkauf der erzeugten Rohstoffe und Produkte schaffen.

Detaillierte Angaben zu weiterem Forschungsbedarf und weiteren Entwicklungsperspektiven finden sich jeweils am Ende der einzelnen APs in Kapitel 3, insbesondere zu den Tätigkeiten der Sekundärraffination im Labor (Vgl. Kapitel 3.5, 3.6, 3.7.1 und 3.7.2).

Die Umsetzung im Rahmen des EFRE-Förderprogramms "Bioökonomie Bio-Ab-Cycling" und die Förderung durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg zeigen die politische Unterstützung für diese zukunftsweisende Technologie. Die in Backnang entstandene halbertechnische Demonstrationsanlage stellt dabei einen entscheidenden Schritt zur praktischen Erprobung und Weiterentwicklung dar.

Um die Technologie aus dem Pilotprojekt in eine breite Anwendung zu überführen, sind mehrere Maßnahmen erforderlich:

- 1) **Technologie-Validierung und Skalierung:** Die erprobten Technologien müssen weiter optimiert und für größere Anlagengrößen skaliert werden. Der erfolgreiche Betrieb der Demonstrationsanlage in Backnang dient dabei als Grundlage für zukünftige industrielle Anwendungen.
- 2) **Regulatorische und politische Unterstützung:** Eine Anpassung von Vorschriften und Anreizen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft kann die Implementierung der BW2Pro-Technologien erleichtern. Dazu gehören beispielsweise Förderprogramme für nachhaltige Bioökonomieprojekte sowie regulatorische Rahmenbedingungen zur Nutzung von Sekundärrohstoffen.
- 3) **Wirtschaftliche Anreize und Marktintegration:** Die Wettbewerbsfähigkeit der erzeugten Produkte muss weiter analysiert und gestärkt werden. Partnerschaften mit Unternehmen aus der Verpackungs-, Landwirtschafts- und Biokunststoffbranche sind essenziell, um den Markteintritt zu erleichtern.
- 4) **Öffentlichkeitsarbeit und Technologietransfer:** Die Akzeptanz neuer Verfahren hängt maßgeblich von der Information und Einbindung relevanter Stakeholder ab. Eine gezielte Kommunikationsstrategie sowie der Technologietransfer in Wirtschaft und Gesellschaft sind daher entscheidend.
- 5) **Weiterentwicklung der Forschung:** Die enge Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie sollte über die Projektlaufzeit hinaus fortgeführt werden, um die Prozesse weiter zu verbessern und neue Anwendungsbereiche zu erschließen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Projekt BW2Pro eindrucksvoll zeigt, wie Bioabfälle effizient in wertvolle Rohstoffe umgewandelt werden können. Die erzielten Ergebnisse legen den Grundstein für eine breitere Anwendung der entwickelten Technologien und Verfahren in der Bioabfallverwertung.

Die erfolgreiche Umsetzung und Ausweitung des BW2Pro-Ansatzes könnte langfristig einen wichtigen Beitrag zur europäischen Kreislaufwirtschaft und Klimaneutralität leisten. Die Kombination aus stofflicher und energetischer Verwertung reduziert nicht nur CO₂-Emissionen, sondern steigert auch die Ressourceneffizienz. Dies könnte den Weg für eine flächendeckende Anwendung ebnen und zur Standardlösung für kommunale Bioabfallverwertung werden.

Durch enge Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Industrie und Kommunen kann BW2Pro zu einem Modell für nachhaltige Bioabfallnutzung werden, das weit über Baden-Württemberg hinaus Anwendung finden kann. Die kommenden Jahre werden entscheidend sein, um das Potenzial dieser Technologien weiter zu erschließen und den Übergang in eine großflächige, wirtschaftlich tragfähige Umsetzung zu ermöglichen. Die Bioraffinerie in Backnang wird dabei als Blaupause für weitere Anlagen dienen und wichtige Erkenntnisse für zukünftige Entwicklungen liefern.

Damit dieser Schritt erfolgreich durchgeführt werden kann, sind weitere Forschungsarbeiten und Optimierungen der Anlage sowie der Produkte erforderlich, um ihr volles Potenzial auszuschöpfen. Da die Pilotanlage in Backnang weiterhin bestehen bleibt, kann sie als wertvolle Grundlage für zukünftige Optimierungen, weiterführende Forschung und eine mögliche Skalierung der entwickelten Verfahren genutzt werden.

6 Literaturverzeichnis

- Abbasi, Maryam; Pokhrel, Dikshya; Coats, Erik R.; Guho, Nicholas M.; McDonald, Armando G. (2022): Effect of 3-Hydroxyvalerate Content on Thermal, Mechanical, and Rheological Properties of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) Biopolymers Produced from Fermented Dairy Manure. In: *Polymers* 14 (19). DOI: 10.3390/polym14194140.
- Arenas-López, Christian; Locker, Jessica; Orol, Diego; Walter, Frederik; Busche, Tobias; Kalinowski, Jörn et al. (2019): The genetic basis of 3-hydroxypropanoate metabolism in *Cupriavidus necator* H16. In: *Biotechnology for biofuels* 12, S. 150. DOI: 10.1186/s13068-019-1489-5.
- Bagheri, Amir Reza; Laforsch, Christian; Greiner, Andreas; Agarwal, Seema (2017): Fate of So-Called Biodegradable Polymers in Seawater and Freshwater. In: *Global Challenges* 1 (4), S. 1700048. DOI: 10.1002/gch2.201700048.
- Berezina, Nathalie (2012): Enhancing the 3-hydroxyvalerate component in bioplastic PHBV production by *Cupriavidus necator*. In: *Biotechnology Journal* 7 (2), S. 304–309. DOI: 10.1002/biot.201100191.
- Berezina, Nathalie; Yada, Bopha (2016): Improvement of the poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) production by dual feeding with levulinic acid and sodium propionate in *Cupriavidus necator*. In: *New biotechnology* 33 (1), S. 231–236. DOI: 10.1016/j.nbt.2015.06.002.
- Bioökonomierat (2016): Weiterentwicklung der Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030: Empfehlungen des Bioökonomierates. Online verfügbar unter <https://research.cbs.dk/en/publications/weiterentwicklung-der-nationalen-forschungsstrategie-bio%c3%b6konomie->.
- Blunt, Warren; Levin, David B.; Cicek, Nazim (2018): Bioreactor Operating Strategies for Improved Polyhydroxyalkanoate (PHA) Productivity. In: *Polymers* 10 (11), S. 1197. DOI: 10.3390/polym10111197.
- Bonten, Christian (2020): Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Brodtkorb, N. (2008): Optimierung der Desintegration von Klärschlämmen mit Thermo-Druck-Hydrolyse vor deren anaerober Stabilisierung. Diplomarbeit. Fachhochschule, Braunschweig/Wolfenbüttel. Online verfügbar unter https://opus.ostfalia.de/files/210/Brodtkorb_2008_Thermo-Druck-Hydrolyse_Klaerschlam.pdf, zuletzt geprüft am 17.03.2025.
- Carroll, John J.; Slupsky, John D.; Mather, Alan E. (1991): The Solubility of Carbon Dioxide in Water at Low Pressure. In: *J. Phys. Chem. Ref. Data* 20 (6), S. 1201–1209. DOI: 10.1063/1.555900.
- Chróst, Michał (2023): Enzymatic Pretreatment Optimization to Increase Biogas Production [Master Thesis]. Hochschule Offenburg. Online verfügbar unter <https://opus.hs-offenburg.de/frontdoor/index/index/docid/8058>.
- Circular Bio-based Europe Joint Undertaking (CBE JU): CAFIPLA – Combining carboxylic acid production and fiber recovery from biowaste for a sustainable biorefinery. Online verfügbar unter <https://www.cbe.europa.eu/projects/cafipla>, zuletzt geprüft am 25.03.2025.
- Circular Bio-based Europe, CBE JU: URBIOFIN – Demonstration of an integrated biorefinery for the transformation of Municipal Solid Waste into new Bio-Based Products. Hg. v. Europäische Partnerschaft für zirkuläre Bioökonomie (Circular Bio-based Europe, CBE JU). Online verfügbar unter <https://www.cbe.europa.eu/projects/urbiofin>, zuletzt geprüft am 25.03.2025.
- Donau Silphie GmbH: Die Silphie – Eine nachhaltige Energie- und Faserpflanze. Online verfügbar unter <https://www.donau-silphie.de/silphien-pflanze/>, zuletzt geprüft am 25.03.2025.
- Dröge, S.; Ballmann, P.; Lesmeister, S. (2023): Entwicklung und Prüfung der technischen Umsetzbarkeit eines kontinuierlichen mikrobiell-enzymatischen Hydrolyseverfahrens zum Strohaufschluss unter halophilen Bedingungen. Teilvorhaben 1: Etablierung eines Sole-Prozesses im technischen Maßstab. Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V. (PFI). Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.fnr.de/fileadmin/projektdatenbank/2220NR265A.pdf>.
- Energiepark Hahnennest GmbH & Co. KG: Energiepark Hahnennest – Nachhaltige Energieerzeugung aus Biomasse. Online verfügbar unter <https://www.energiepark-hahnennest.de/>, zuletzt geprüft am 25.03.2025.

energiezukunft.eu: Energiepflanze für Strom, Wärme und Faser. Online verfügbar unter <https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/bioenergie/energiepflanze-fuer-strom-waerme-und-faser/>, zuletzt geprüft am 25.03.2025.

Han, K.; Levenspiel, O. (1988): Extended monod kinetics for substrate, product, and cell inhibition. In: *Biotechnology and bioengineering* 32 (4), S. 430–447. DOI: 10.1002/bit.260320404.

Huschner, Franz; Grousseau, Estelle; Brigham, Christopher J.; Plassmeier, Jens; Popovic, Milan; Rha, ChoKyun; Sinskey, Anthony J. (2015): Development of a feeding strategy for high cell and PHA density fed-batch fermentation of *Ralstonia eutropha* H16 from organic acids and their salts. In: *Process Biochemistry* 50 (2), S. 165–172. DOI: 10.1016/j.procbio.2014.12.004.

Jank, Anna; Müller, Wolfgang; Waldhuber, Sebastian; Gerke, Frédéric; Ebner, Christian; Bockreis, Anke (2017): Hydrocyclones for the separation of impurities in pretreated biowaste. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 64, S. 12–19. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.03.001.

Kranert (2017): Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

KrWG: Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Fundstelle: Bundesgesetzblatt (BGBl.) I S. 212, 2012, zuletzt geändert durch Gesetz vom 13. April 2023 (BGBl. I S. 94).

Lindorfer, J.; Steinmüller, H.; Auer, W.; Jäger, A.; Eder, A. (2010): Untersuchung der Vorhydrolyse von Lignocellulose Rohstoffen mittels Steam Explosion. In: *Chemie Ingenieur Technik* 82 (8), S. 1169–1176. DOI: 10.1002/cite.201000057.

Łukasiewicz, Johanna (2024): Optimization and Processing of Liquid Biowaste into a Complex Medium suitable for *Trichoderma reesei* Growth and Proteins Production [Master Thesis]. Hochschule Offenburg. Online verfügbar unter <https://opus.hs-offenburg.de/frontdoor/index/index/docid/9406>.

Maurer, Daniel (2022): Optimierung der Cellulase-Produktion mit *Trichoderma reesei* durch eine automatisierte Feed-Regelung [Bachelor Thesis]. Hochschule Offenburg.

Maurer, Daniel (2024): Prozessmodellierung der Cellulase-Produktion mit *Trichoderma reesei* zur Entwicklung eines digitalen Zwillings [Master Thesis]. Hochschule Offenburg.

Mukherjee, Anindya; Koller, Martin (2023): Microbial PolyHydroxyAlkanoate (PHA) Biopolymers-Intrinsically Natural. In: *Bioengineering* 10 (7), S. 855. DOI: 10.3390/bioengineering10070855.

Obilor, Ezezi Isaac; AMADI, Eric Chikweru (2018): Test for Significance of Pearson's Correlation Coefficient (r). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/ezezi-isaac-obilor/publication/343609693_test_for_significance_of_pearson's_correlation_coefficient_r.

Rischbeck, M. (2023): Scale-Up and Optimisation of a *Trichoderma reesei* Fermentation for Efficient Cellulase Production [Master Thesis]. Hochschule Offenburg.

Senfter, T. (2018): Kontinuierliche Störstoffabscheidung in der Klärschlamm-Co-Fermentation mittels Zentrifugalabscheider. Dissertation.

Sheu, Der-Shyan; Chen, Yuh-Ling Lee; Jhuang, Wun-Jyun; Chen, Houn-Yung; Jane, Wann-Neng (2018): Cultivation temperature modulated the monomer composition and polymer properties of polyhydroxyalkanoate synthesized by *Cupriavidus* sp. L7L from levulinate as sole carbon source. In: *International journal of biological macromolecules* 118 (Pt B), S. 1558–1564. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.06.193.

Tanadchangsang, Nuttapol; Yu, Jian (2013): Miscibility of natural polyhydroxyalkanoate blend with controllable material properties. In: *J of Applied Polymer Sci* 129 (4), S. 2004–2016. DOI: 10.1002/app.38906.

The engineering ToolBox (2005): Oxygen - Solubility in Fresh and Sea Water vs. Temperature. Online verfügbar unter https://www.engineeringtoolbox.com/oxygen-solubility-water-d_841.html, zuletzt geprüft am 18.12.2024.

BioAbfV: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV). Fundstelle: Bundesgesetzblatt (BGBl.) I S. 658, 2013, zuletzt geändert durch Verordnung vom 28. April 2022 (BGBl. I S. 674).

Welzel, L. (2024): Entwicklung eines nachhaltigen Kultivierungsmediums aus Bioabfall für die Cellulase Herstellung mit *Trichoderma reesei* [Bachelor Thesis]. Hochschule Offenburg. Online verfügbar unter <https://opus.hs-offenburg.de/frontdoor/index/index/docid/8701>.

Yi, Hyung-Wook; Lee, Yeo-ul; Lee, Myung-won; Kwon, Je-Young; Kang, Myungchang (2021): Analysis and Evaluation of Separation Efficiency on Mass Flow of Mini Hydro Cyclone Separator Manufactured by 3D Printing. In: *KSMPE* 20 (7), S. 89–96. DOI: 10.14775/ksmpe.2021.20.07.089.

Yu, Jian; Chen, Lilian X. L.; Sato, Shun (2009): Biopolyester Synthesis and Protein Regulations in *Ralstonia eutropha* on Levulinic Acid and Its Derivatives from Biomass Refining. In: *J Biobased Mat Bioenergy* 3 (2), S. 113–122. DOI: 10.1166/jbmb.2009.1018.

Zielińska, Olga (2023): Development of Technical Substrate for Cellulase Production using *Trichoderma reesei* [Master Thesis]. Hochschule Offenburg. Online verfügbar unter <https://opus.hs-offenburg.de/frontdoor/index/index/docid/7955>.

Anhang 1 Abbildungen



Abbildung 47: Zerkleinerungseinheit außerhalb der Halle



Abbildung 48: Aufbereitungsaggregate innerhalb der Halle

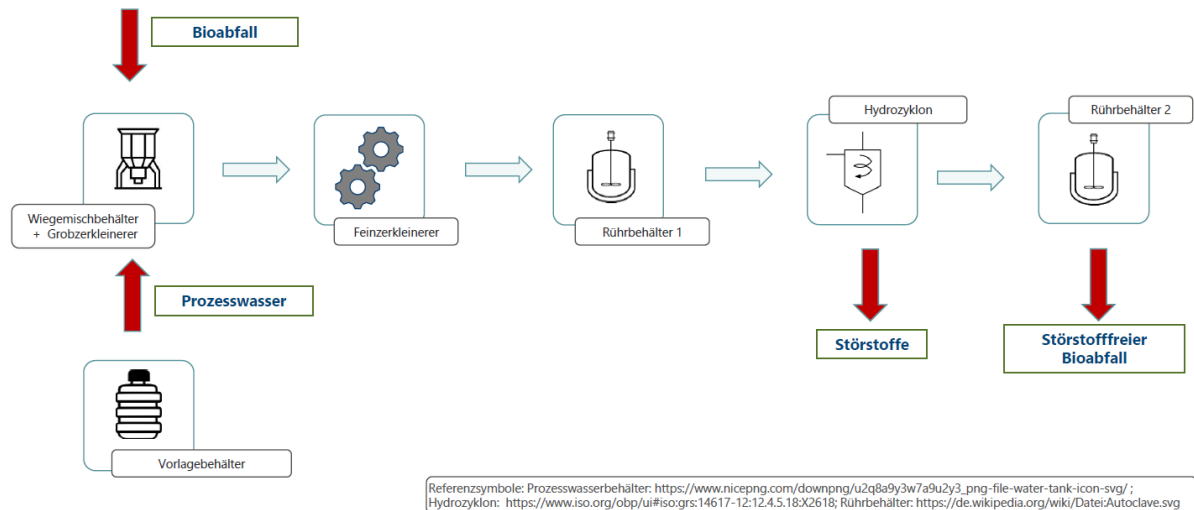


Abbildung 49: Verfahrensschema der Aufbereitung von Bioabfall (Quelle: siehe Anhang 4)



Abbildung 50: Schaltschrank der TDH (links), Hydrolysereaktor 400 l (mitte), Expansionsstank 200 l und Pulper, sowie Entstipper (rechts)



Abbildung 51: Linkes Bild: Biogasanlage mit Hydrolysereaktor (links), Festbettreaktor (Mitte) und zwei Vorlage-tanks (rechts); Mitte: Füllkörper und Feststofflaborfermenter; Rechts: Filtrationseinheit und Pumpen

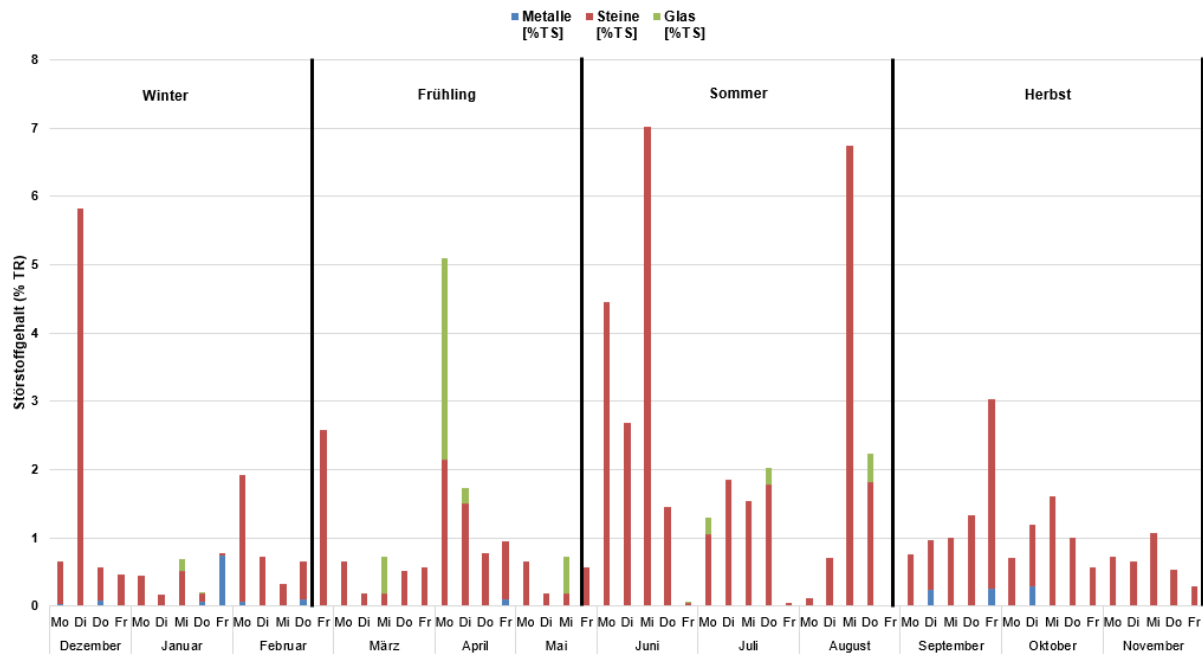


Abbildung 52: täglicher Störstoffgehalt

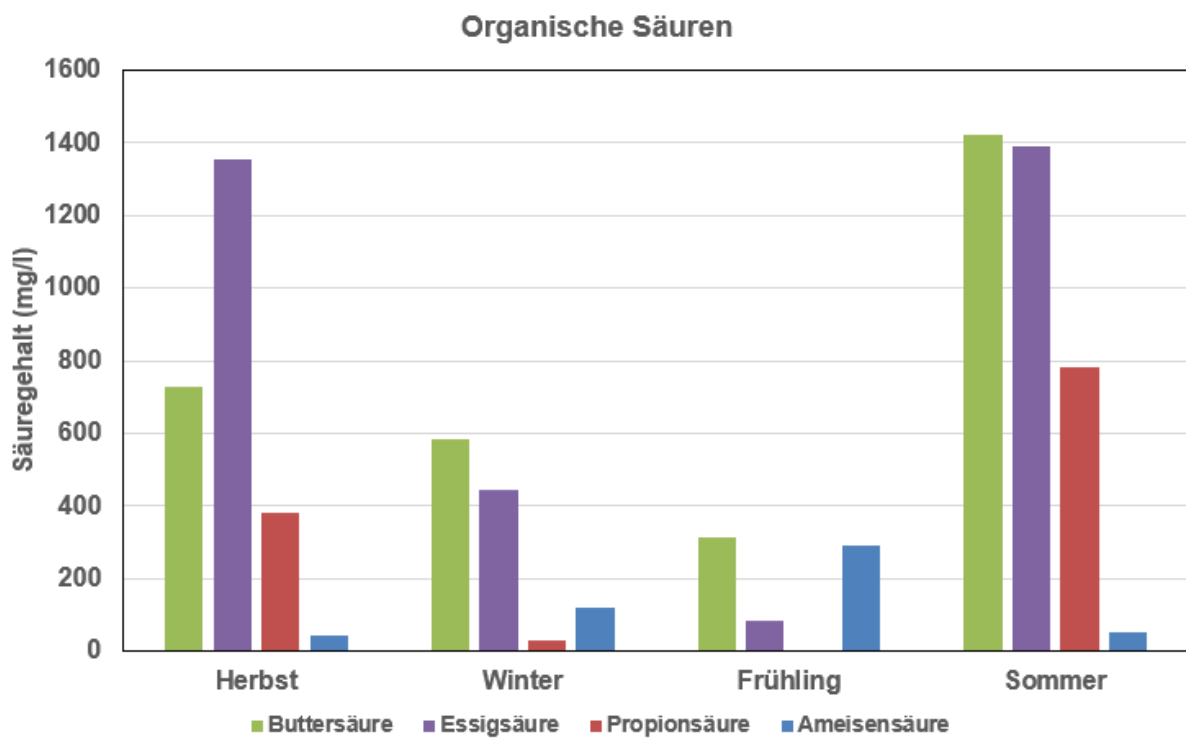


Abbildung 53: organische Säuren im Bioabfall

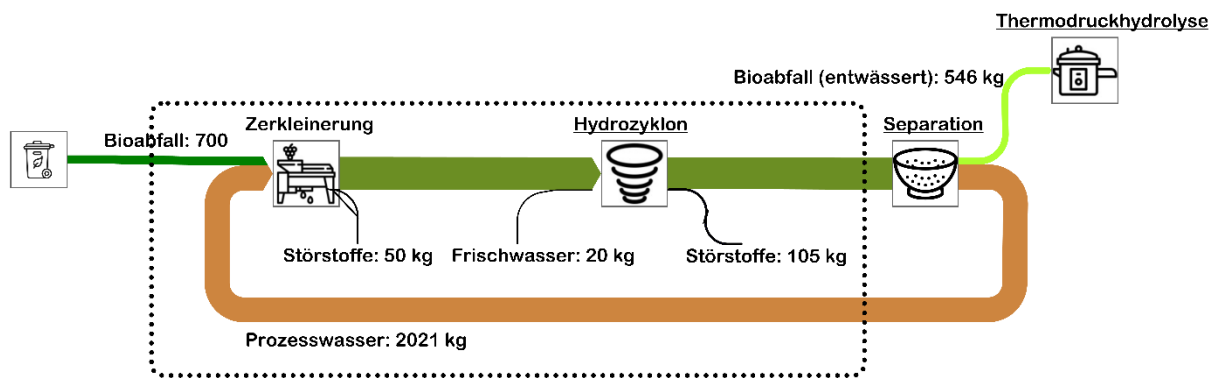


Abbildung 54: Massenbilanz der Aufbereitung von 700 kg Bioabfall (Quelle: siehe Anhang 4)

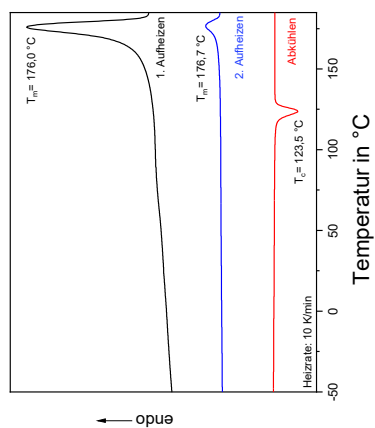


Abbildung 55: Von oben links im Uhrzeigersinn: Rohstoff, feucht; Siebüberlauf, feingesiebt, Rohstoff trocken, Rohstoff gebleicht, Rohstoff gebleicht, gemahlen

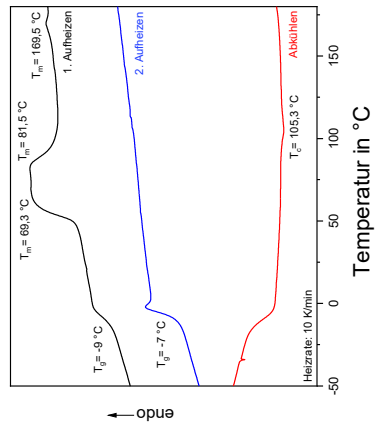


Abbildung 56: Siebüberlauf mit Grobfraktion aus der Faser

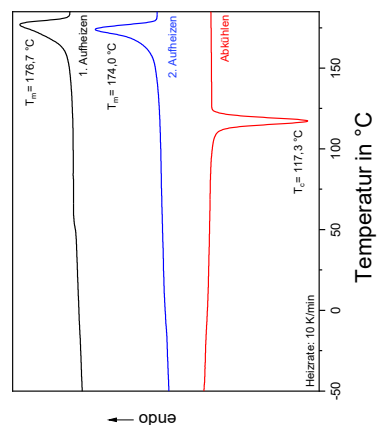
PHB 1x extrudiert



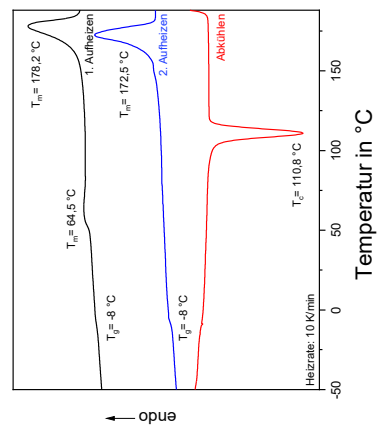
PHBV 1x extrudiert



PHB/PHBV-Blend 75:25



PHB/PHBV-Blend 50:50



PHB/PHBV-Blend 25:75

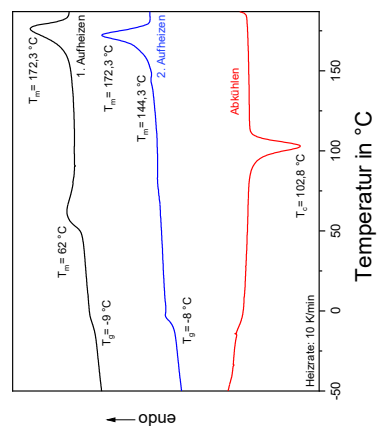


Abbildung 57: Thermogramme der PHB/PHBV-Blends sowie der Ausgangswerkstoffe PHB und PHBV

Tabelle 14: Korrelationsanalyse diverser Fermentationsparameter zu Identifizierung der Haupteinflussgrößen aus den Copolymeranteil (3-Hydroxyvalerat). Angegeben sind der Pearson Koeffizient r und der Signifikanztest für lineare Abhängigkeit durchgeführt auf dem angebenen Signifikanzniveau α („Wahr“ entspricht dem Ablehnen der Nullhypothese) (Obilor und AMADI 2018). CO_2 Löslichkeit berechnet nach Carroll et al. (1991), O_2 Konzentration berechnet über die durchschnittliche Sättigung und der Löslichkeit nach The engineering ToolBox (2005)

Signifikanz	α	r	Einheit	Parameter
WAHR	0.1%	0.964	mg L^{-1}	Löslichkeit $_{\text{CO}_2}$
WAHR	0.1%	0.959	bar	p_{Kopfraum}
WAHR	0.1%	0.951	bar	$P_{\text{Hydrostatik, h=50 \%}}$
WAHR	1.0%	0.920	L min^{-1}	V_G
WAHR	1.0%	0.862	L	V
FALSCH	5.0%	0.665	m s^{-1}	Rührerumfangs- geschwindigkeit $_{\text{max}}$
FALSCH	5.0%	0.580	g L^{-1}	$C_{X, \text{start}}$
FALSCH	5.0%	0.511	mg L^{-1}	$C_{\text{O}_2, x}$
FALSCH	5.0%	0.444	g L^{-1}	C_X , nach GLucose
FALSCH	5.0%	0.064	-	$RQ_{\text{mean, no nitrogen}}$
FALSCH	5.0%	-0.039	-	pH_{min}
FALSCH	5.0%	-0.075	-	$RQ_{\text{mean, with nitrogen}}$
FALSCH	5.0%	-0.117	g L^{-1}	$C_{\text{gluc, start}}$
FALSCH	5.0%	-0.259	g L^{-1}	$C_{\text{LA, max}}$
FALSCH	5.0%	-0.436	-	pH_{max}
FALSCH	5.0%	-0.474	h	t
WAHR	5.0%	-0.839	$\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$	CER_{mean}
WAHR	5.0%	-0.852	$\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$	OUR_{mean}
WAHR	5.0%	-0.871	$\text{g}_{\text{PHA}} \text{g}_X^{-1} \text{h}^{-1}$	$q_{P, \text{max}}$
WAHR	1.0%	-0.876	$\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$	CER_{max}

Anhang 2 Öffentlichkeitsarbeit

Publikationsliste:

2022:

- Fachartikel "Biowaste to Products: Bioraffinerie verwandelt Bioabfall in neue Produkte", 29.08.2022, <https://www.biooekonomie-bw.de/fachbeitrag/aktuell/biowaste-products-bioraffinerie-verwandelt-bioabfall-neue-produkte>
- Fachbeitrag „Projekt BW2Pro – Bioraffinerie verwandelt Bioabfall in neue Produkte“ <https://www.kompost-biogas.info/projekt-bw2pro-bioraffinerie-verwandelt-bioabfall-in-neue-produkte/>
- Fachartikel „Von der Bioabfallverwertungsanlage zur Bioraffinerie“, RecyclingPortal (28.06.2022)
- Fachartikel „Von der Bioabfallverwertungsanlage zur Bioraffinerie“, bvse (27.06.2022)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro auf dem Bioabfallforum 2022 (Vortrag, 27.06.2022)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro auf den Biogas Infotagen (Vortrag und Poster, Ulm, 6./7. Juli 2022)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro bei der Satellitenveranstaltung des Bioökonomiekongress 2022 (Poster, Stuttgart)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro auf der internationalen „Sustainable Energy for a Sustainable Future Conference“ (Vortrag, San Jose (Costa Rica), 24.-26.10.2022)
- Daniel Maurer (2022); „Fermentationsentwicklung von Cellulasen mit Trichoderma reesei“ Bachelorarbeit Studiengang Biotechnologie; University of Applied Sciences Offenburg

2023:

- Vorstellung des Projekts BW2Pro beim After-Work Event „Bioökonomie in der Bioabfallwirtschaft“ der „Fachinitiative urbane und industrielle Bioraffinerien“ und dem „Kompetenzzentrum für Bioabfall“ der LUBW (Vortrag, 28.09.2023) <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/blog/-/blogs/biooekonomie-in-der-bioabfallwirtschaft-after-work-event>
- Maximilian Rischbeck (2023), „Biowaste based Trichoderma reesei fermentation for efficient cellulase production“ Masterthesis Studiengang MBT; University of Applied Sciences Offenburg
- Vorstellung der Ergebnisse der Labor-Voruntersuchungen des Projekts BW2Pro auf der internationalen Central European Biomass Conference CEBC 2023, (Vortrag, Graz (Österreich), 19.01.2023) und Tagungsbandbeitrag (Gregor Sailer)
- Tagungsbandbeitrag und Poster beim DGAW-Wissenschaftskongress 2023, Hamburg (Axel Steffens und Mustafa Kemal Ak)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro beim Biomethan-Mobilitätstag, Unterer Lindenhof (Poster, 30.6.23)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro bei der Fachtagung Biogas in der Landwirtschaft, KTBL & FNR Event (Poster, Bonn, 11.-12.9.2023)
- Tagungsbandbeitrag: "Nachhaltige Produkte aus Bioabfall und biogenen Reststoffen durch Steam Explosion und Hochlastfermentation - Biowaste to Products (BW2Pro)" Fachtagung Biogas in der Landwirtschaft, KTBL & FNR Event (2023)
- Lewerenz, S.; Sailer, G.; Pelz, S.; Lambrecht, H. (2023): Life cycle assessment of biowaste treatment – considering uncertainties in emission factors, Cleaner Engineering and Technology (Elsevier), <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100651>
- Hülsemann, Benedikt; Baumgart, Marian; Lenz, Leonhard; Elviliana; Föllmer, Marie; Sailer, Gregor (2023): Coupled Biogas and Fiber Production from Agricultural Residues and Energy Crops with Steam Explosion Treatment. In: Applied Biosciences 2 (2), S. 278–291. <https://doi.org/10.3390/applbiosci2020019>
- Olga Zielinska (2023), „Development of a technical substrate for cellulase production using Trichoderma reesei“, Bachelorarbeit Studiengang Master of Process Engineering; University of Applied Sciences Offenburg
- Michal Chrost (2023), „Increasing the Biogas Productivity by Enzymatic Pretreatment“ Masterthesis; University of Applied Sciences Offenburg
- Vorstellung des Projekts BW2Pro auf den Biogas Infotagen Ulm 2023 (Poster und Ausstellungsstand, 8./9.3.2023)

- Vorstellung des Projekts BW2Pro beim Biogas Praktikertag (Vortrag und Ausstellungsstand, Uni Hohenheim, 08.02.2023)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro (Vortrag, ValBio Workshop, Stuttgart, 01.02.2023)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro (Vortrag, Workshop-Reihe Fachinitiative Bioraffinerie, Online Workshop, 09.03.2023)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro auf dem Sardinia Symposium (2 Poster, 09.-13.10.2023)
- Beitrag zum PHA-Themenkomplex: Eco-friendly alternative to plastics der Arbeitsgruppe in der Reihe „70 Jahre, 70 Stimmen“ (Dr. Pravesh Tamang)
- Online-Vortrag und Tagungsbandbeitrag: "Thermische Stabilisierung von PHB mittels Reaktiver Extrusion" beim 28. Stuttgarter Kunststoffkolloquiums des IKT (01.-03.03.2023)

2024:

- Vorstellung des Projekts BW2Pro auf dem internationalen Bioökonomiekongress Baden-Württemberg: „BW2Pro – gekoppelte Biogas und Faserproduktion aus Biomüll“ (Vortrag und Exponatausstellung, Dr. Hülsemann, Dr. Helle) Fellbach, 18.-19.09.2024
- Tagungsbandbeitrag und Poster beim DGAW-Wissenschaftskongress 2024, Wien (Axel Steffens, Mustafa Kemal Ak, 15./16.02.2024)
- Tagungsbandbeitrag 17. Biogas Innovationskongress Osnabrück 2024
- Lynn Welzel (2023/2024) „Entwicklung eines nachhaltigen Kultivierungsmediums aus Bioabfall für die Cellulase Herstellung mit Trichoderma reesei“, Bachelorarbeit Studiengang Biotechnologie; University of Applied Sciences Offenburg
- Joanna Lukasiewicz (2024) „Optimization and Processing of Liquid Biowaste into a Complex Medium suitable for Trichoderma reesei Growth and Proteins Production“, Masterarbeit, Studiengang Master of Biotechnology; University of Applied Sciences Offenburg
- Fachbeitrag im Biogas-Journal 06/2024: Energetische und stoffliche Nutzung von Bioabfall – ein Status-quo-Bericht, Dr. Benedikt Hülsemann, Marian Baumgart, Dr. Hans Oechsner, Axel Steffens, David Voßschmidt
- Lara, C.; Steffens, A.; Voßschmidt, D.; Ak, Mustafa Kemal; Preyl, Volker; Huang, Jingjing; Maurer, C.; Sprafke, J; Senfter, T. and Nelles, M. (2024, preprint): From Season to Season: The Dynamic Nature of Organic Waste Entering a Waste Treatment Facility
- Vorstellung von Projektergebnissen bei den Biogas Infotagen Ulm 2024 (Vortrag, Poster, 31.01./01.02.2024)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro beim 17. Biogas Innovationskongress Osnabrück (Vortrag, 22.-23.5.2024)
- Vorstellung des „Pilotprojekt BW2PRO: modulare Bioraffinerien zur Wertstoffrückgewinnung aus Bioabfall“ beim Stakeholder-Workshop „Rethinking Ressources – Innovative Verfahren für die urbane und industrielle Bioökonomie“ im Rahmen des Projektes „Industrielle Bioökonomiestrategie für die Region Stuttgart“ (InBioRegS), (Stuttgart, 22. November 2023)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro beim Great Cycle Meeting (Vortrag, Beijing, China, 05.09.2024)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro beim Progress on Biogas beim IBBK (Vorträge, Hohenheim, 02./03.09.2024)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro beim Abfallvergärungstag und GGG Seminar (Vortrag, Bremen, 27.-29.02.2024)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro im Seminar des Innovationsfelds Wassertechnologien, Vorstellung des Projekts BW2Pro bei der Himmelfahrtstagung on Bioprocess Engineering 2024 (Poster, Regensburg, 06.08.2024)
- Wertstoffgewinnung und Scale-up am Fraunhofer IGB (Vortrag, 04.07.2024)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro beim 11th International Conference on Sustainable Solid Waste Management (Vortrag, Rhodes, Greece, 19.–22.06.2024)
- Abedullah N. H. Abualqomboz (2024) “Hydrocyclone based impurity removal from domestic biowaste: characterization and optimization of influent and effluent products in a biogas demonstration plant”, Master Thesis, ISWA Uni Stuttgart
- Vortrag Oechsner H.: Fibers and Biogas from Separately Collected Municipal Biowaste. International Conference IBA –IFIBiop XI, 2024, Hongkong, China, 01.12 - 06.12.2024

2025:

- Vortrag und Stand: Hülsemann B.: „Bioökonomiekonzept der Biogas- und Faserproduktion“ Biogasinfortage, Ulm, 29.01 - 30.01.2025
- Vortragsfolien und Führung: Hülsemann B.: „Bioökonomiekonzept der Biogas- und Faserproduktion FnBB Mitgliedervollversammlung 2025, Backnang, 14.02.2025

Wissenstransfer- und Veranstaltungsliste:

2022:

- PM vom 07.07.2022 - <https://renewable-carbon.eu/news/von-der-bioabfallverwertungsanlage-zur-bioraffinerie/>
- PM vom 03.08.2022: <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.uni-projekt-in-stuttgart-wie-pflanztoepfe-aus-speiseresten-entstehen.cd1bec48-195c-45fb-87ce-226c621d9b4b.html>
- Vorstellung des Projekts BW2Pro und Stand auf der K-Messe (Düsseldorf, 19.-26.10.2022)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro auf dem Landwirtschaftlichen Hauptfest 2022 (Ausstellungsstand, Cannstatter Wasen, 25.09. – 03.10.2022)
- Bericht über Projekt BW2Pro in Zeitschrift "Forschung im Fokus"
- Vorstellung des Projekts BW2Pro auf dem Projekttreffen mit der Universität Sunyani (Ghana, 2022)

2023:

- PM vom 22.09.2023 – Die inneren Werte des Biomülls – Waiblinger Kreiszeitung
- PM vom 20.09.2024 - Biovergärungsanlage in Backnang: Wie aus Biomüll Blumentöpfe werden – BKZ - <https://www.bkz.de/nachrichten/biovergaerungsanlage-in-backnang-wie-aus-biomuell-blumentoepe-werden-206045.html>
- Vorstellung des Projekts BW2Pro am Tag der offenen Tür in der Uni Hohenheim (Ausstellungsstand, 08.07.2023)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro beim After-Work Event „Bioökonomie in der Bioabfallwirtschaft“ der „Fachinitiative urbane und industrielle Bioraffinerien“ und dem „Kompetenzzentrum für Bioabfall“ der LUBW (Anlagenführung und Exponatausstellung, 28.09.2023) <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/blog/-/blogs/biooekonomie-in-der-bioabfallwirtschaft-after-work-event>
- Vorstellung des Projekts BW2Pro beim Efre-Programm – Tag der offenen Tür 2023 (Karlsruhe, 22.06.2023), <https://www.biointelligenz.de/news/efre-programm-tage-der-offenen-tuer-2023/>
- Science Slam im Rahmen der Veranstaltung: Bioökonomie: Wie stellst du dir eine nachhaltige Zukunft vor? – Kunstworkshop (30.06.2023, Mannheim, www.buga23.de/veranstaltungs-kalender/science-slam-biooekonomie-wie-stellst-du-dir-eine-nachhaltige-zukunft-vor-kunstworkshop/)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro hinsichtlich Biokunststoffen auf der Internationalen Fachmesse für Kunststoffverarbeitung FAKUMA (Ausstellungsstand, Friedrichshafen, 17.-21.10.2023)
- Vorstellung des Projekts BW2Pro bei Palatina Business Angels (2023)
- Pilotanlagenführung einer indischen Delegation durch das MLR (Backnang, 2023) <https://www.sabine-kurtz.de/besuch-aus-der-ferne-die-bioraffinerieanlage-in-backnang-weckt-interesse/>
- Pilotanlagenführung mit Industriellen aus China (Backnang, 2023)
- Pilotanlagenführungen für IHK-Gruppen (Backnang, 2023)

2024

- Projekthomepage www.bw2pro.de
- BW2Pro-Infolyer
- Gewinner des Biogas-Innovationspreises in Silber in der Kategorie Wissenschaft, Thema der Arbeit: Biogas, Pflanztopfe und Torfersatz aus kommunalem Abfall, <https://www.bauernverband.de/presse-medien/pressemitteilungen/pressemitteilung/faserreiche-stoffe-im-mittelpunkt-der-innovationen>
- Vorlesung zu BW2Pro im Masterstudiengang „Nachwachsende Rohstoffe und Bioenergie – Modul Research Front Mapping“; Universität Hohenheim, 30.11.2023

- Abschluss der Dissertation von Gregor Sailer zum Thema „Ansatzpunkte für eine optimierte Bioabfallverwertung“ – BW2Pro Bioraffinerie im Prüfungskolloquium diskutiert, Universität Hohenheim, Oktober 2024
- Pilotanlagenführung einer Taiwanesischen und Amerikanischen Gruppe (Backnang, 05.09.2024)
- Pilotanlagenführung einer Schulklasse und Exponatausstellung (Backnang, 22.-23.07.2024)
- Ausstellungsstand bei der Landesgartenschau in Wangen (03.09.2024)
- Pilotanlagenführung einer Besuchergruppe aus Norwegen zum Thema Biogas und Bioökonomie (Backnang, 06.03.2024)
- Imagefilm zur PHA-Produktion vom 28.02.2024, IGVP Uni Stuttgart
- Abschlussveranstaltung des Projekts BW2Pro in Hohenheim (24.10.2024)
- Imagefilm zur Pilotanlage des Projekts BW2Pro in Backnang (siehe www.bw2pro.de)

Anhang 3 Meilensteine der APs

Arbeitspaket	Meilenstein	Beschreibung
0	M0.1	Aufbau der Demonstrationsanlage in Backnang abgeschlossen
	M0.2	Rückbau der Demonstrationsanlage
	M0.3	Kick-Off-Treffen und Verbundtreffen zur Weichenstellung beim weiteren Vorgehen
	M0.4	Abschlussbericht einreichen
1	M1.1	Orientierende Charakterisierung des Bioabfall in Backnang abgeschlossen
	M1.2	Aufbereitungsaggregate in Backnang einsatzbereit für Demonstrationsversuche
	M1.3	Betriebsparameter und Einstellungen für die TDH sind untersucht
	M1.4	Wissenschaftliches Monitoring zur Aufbereitungstechnik für Bioabfall zur Verwendung in TDH abgeschlossen
	M1.5	Analysen und Monitoring der Einflussparameter auf die Aufbereitungsqualität und Störstoffentfrachtung abgeschlossen
	M1.6	Wissenschaftliche Evaluierung der Einflussparameter auf AP2 und AP3 abgeschlossen
2	M2.1	Vorversuche im Labor zur TDH und zur Planung der Praxisanlage abgeschlossen
	M2.2	Anlage zur Thermodruckhydrolyse in Backnang einsatzbereit für Versuche
	M2.3	Seperator tests mit verschiedenen Substraten abgeschlossen
	M2.4	Stoffströme in Abhängigkeit der Zusammensetzung der Inputstoffe und Einstellungen bestimmt
	M2.5	Energieverbrauch bei den versch. Varianten ermittelt als Basis für Wirtschaftlichkeit und ökologischer Bewertung
	M2.6	Methanertrag der Outputfraktionen bestimmt und Beginn weiterer Optimierung
	M2.7	Optimaler Energieoutput des gesamten Systems ermittelt
	M2.8	Bestimmung des Energieoutputs (Methanertrag) abgeschlossen
	M2.9	Untersuchung der Pülpe auf Energiemenge in Abh. des Inputs abgeschlossen
3	M3.1	Umbau der 6 Hochlast-Fermenter-Laboranlage zur Methanerzeugung abgeschlossen
	M3.2	Festbett-Demonstrationsanlage in Backnang aufgebaut und einsatzbereit
	M3.3	Einfluss von Verweilzeit und Raumbelastung ermittelt und Verfahren angepasst und optimiert
	M3.4	Enzymeinfluss überprüft und Empfehlung erarbeitet
	M3.5	Einfluss des Ausgangsmaterials (z.B. Sommer/Winter) auf Qualität und Menge des Outputs erfasst
	M3.6	Risiko durch veränderte Inhaltstoffe/Hemmstoffe ermittelt
	M3.7	Energieoutput der verschiedenen Varianten erfasst als Basis für Wirtschaftlichkeit und Ökologiebewertung

Abbildung 58: Meilensteine der APs 0-3

Arbeits-paket	Meilen-stein	Beschreibung
4	M4.1	Anlage zur Fasertrocknung und -Pressung in Backnang aufgebaut
	M4.2	Erste Erkenntnisse zu Stoffströmen und Input erlangt
	M4.3	Erkenntnisse zur Faserqualität und -Zusammensetzung in Abhängigkeit der Varianten erfasst
	M4.4	Stoffströme und Siebung untersucht
	M4.5	Untersuchung zur Energieeffizienz abgeschlossen - Daten weitergegeben
	M4.6	Funktion der Topfpresse belegt und Übergang zur Produktion bei versch. Ausgangsbedingungen
5	M5.1	Festlegung zur Zusammensetzung des Produktionsmediums
	M5.2	Festlegung der Prozessparameter der Fedbatchfermentation
	M5.3	Festlegung Einsatzkonz. Cellulasen für AP3
6	M6.1	Eingangsströme, Wärmeströme und Anlagenspezifikationen als Datenbereitstellung für AP8 vollständig.
	M6.2	Kostenrechnung für Backnang auf Basis der Ergebnisse für eine Nährstoffrückgewinnungsanlage als Datenbereitstellung für AP9 vollständig.
7.1	M7.1.1	Unterschiedliche Substrate für die PHA-Herstellung evaluiert
	M7.1.2	Skalierung in 7-L Bioreaktor incl DSP gezeigt
	M7.1.3	Skalierung in 42-L Bioreaktor incl DSP gezeigt, 100 g PHA hergestellt
	M7.1.4	Skalierung in 300-L Bioreaktor incl DSP gezeigt, 1 kg PHA hergestellt
	M7.1.5	Skalierung in 1000-L Bioreaktor incl DSP gezeigt, 10 kg PHA hergestellt
7.2	M7.2.1	Kompaktcharakterisierung erster PHA
	M7.2.2	Weitergabe erster Proben für Abbauversuche
	M7.2.3	Erfolgreiche Modifikation im Extruder

Abbildung 59: Meilensteine der APs 4-7

Arbeits-paket	Meilen-stein	Beschreibung
8	M8.1	Ökobilanz Referenzsysteme = Benchmark
	M8.2	erste Rückkopplung System Bioraffinerie an Partner
	M8.3	zweite Rückkopplung System Bioraffinerie an Partner
	M8.4	dritte Rückkopplung System Bioraffinerie an Partner
	M8.5	Aktualisierte Ökobilanz Referenzsysteme
	M8.6	Abschluss Ökobilanz Bioraffinerie
	M8.7	Abschluss Nachhaltigkeitsbewertung
9	M9.1a	Ökonomische Bilanz u. Wirtschaftlichkeitsrechnung - Referenzfall
	M9.1b	Ökonomische Bilanz u. Wirtschaftlichkeitsrechnung - Varianten (Skalierungs- und Lerneffekte)
	M9.2	Marktbericht bioökonomische Produkte und Verfahren
	M9.3 a) u. b)	Übersicht Regulierungsrahmen, Normen, Standards (a), Rechtsrahmen aktualisiert (b)
	M9.4	Report: Transfer ökologische Effekte in ökonomische Parameter und ganzheitlich ökonomische Bewertung
10	M9.5	Bericht: Wertschöpfung und Arbeitsplatzeffekte allgemein und lokal/regional
	M10.1	Erstellung und Veröffentlichung je einer Pressemitteilung und eines Fachartikels (jeweils zum Projektstart und zum Ende der Vorhabenslaufzeit)
	M10.2	Erstellte Projektseite auf BIOPRO Homepage
	M10.3	Durchgeführte Veranstaltung
	M10.4	Durchgeführte Produktklinik
	M10.5	Auswahl des Produkts für die "Produktklinik" ist getroffen
10	M10.6	Erstellung Imagefilm (anstelle Produktklinik)

Abbildung 60: Meilensteine der APs 8-10

Anhang 4 Quellennachweis Piktogramme

Abbildung 1:

Konsumenten - Menschen	Prosymbols from www.flaticon.com
Konsumenten - Fabrik	monkik from www.flaticon.com
Bioabfall, Thermodruckhydrolyse, Bioreaktor (7.1), Biogasanlage	Eucalypfrom www.flaticon.com
Störstoffe, Polymeraufbereitung	photo3idea_studio from www.flaticon.com
Aufbereitung, Fest/Flüssig-Trennung, Nährstoff-rückgewinnung, BHKW, Bioreaktor (5), Ökologische Bewertung, Landwirtschaft	Freepik from www.flaticon.com
Faseraufbereitung, Projektmanagement	mynamepong from www.flaticon.com
Ökonomische Bewertung	prettycons from www.flaticon.com
Öffentlichkeitsarbeit und Transfer	Payungkead from www.flaticon.com

Abbildung 49:

Wiegemischbehälter	Ylivdesign from www.dreamstime.com
Prozesswasserbehälter	https://www.nicepng.com/download/u2q8a9y3w7a9u2y3_png-file-water-tank-icon-svg/
Hydrozyklon	https://www.iso.org/obp/ui#iso:grs:14617-12:12.4.5.18:X2618
Rührbehälter	https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Autoclave.svg

Abbildung 54:

Bioabfalltonne	Smashicons from www.flaticon.com
Zerkleinerung	Iconixar from www.flaticon.com
Hydrozyklon	kornkun from www.flaticon.com
Sieb	Freepik from www.faticon.com
TDH/Schnellkochtopf	Freepik from www.flaticon.com